

УДК 551:550.34

АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ТАЙМЫРА (ГОРЫ БЫРРАНГА) И ВОПРОСЫ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ РЕГИОНАЛИЗАЦИИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2023 г. А. Н. Овсюченко¹*, Р. А. Жостков¹, Д. Е. Едемский²,
А. Л. Собисевич¹, А. И. Сысолин¹, Д. А. Преснов¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Россия

*E-mail: ovs@ifz.ru

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 23.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Представлены первые результаты комплексных геолого-геофизических исследований активной тектоники на северо-востоке Таймыра, выполненных в ходе экспедиции Северного флота и Русского географического общества в 2020 г. В подножии гор Бырранга выявлена и изучена широкая зона активных разрывно-складчатых тектонических деформаций. Общая кинематика смещений – взбросо-надвиговая с признаками сдвига. Структурный стиль молодых тектонических деформаций имеет прямое сходство с хорошо изученными структурными аналогами Центрально-Азиатского сейсмического пояса. Таймырская сейсмостектоническая зона обнаруживает как пространственную, так и генетическую обособленность. Она имеет индивидуальную модель позднекайнозойской геодинамической эволюции и современного сейсмостектонического режима, резко отличную от прилегающей с востока Лаптевоморской рифтовой зоны. Комплекс геолого-геофизических методов показал высокую эффективность применения в условиях Арктики для выявления молодых разрывно-складчатых структур, представляющих собой потенциальные очаги сильных землетрясений.

Ключевые слова: Таймыр, горы Бырранга, активная тектоника, морфотектоника, очаг землетрясения, сейсмическая опасность, микросейсмическое зондирование, георадар.

DOI: 10.31857/S0002333723060133, EDN: UCPHJ

ВВЕДЕНИЕ

Сложность непосредственного геолого-геофизического изучения Арктики всегда была связана, прежде всего, с труднодоступностью – ключевые объекты находятся в суровой, необъятной тундре, на островах арктических архипелагов, в постоянно покрытых снегом горах, под ледниками или на дне Северного Ледовитого океана. Несмотря на бурное развитие систем дистанционного зондирования Земли, многие особенности геологических процессов и строения Арктического региона остаются предметом фундаментальных научных исследований “пионерской” направленности. Новая стратегия развития арктических территорий нашей страны диктует необходимость комплексного и одновременно более детального изучения региональных природных условий, в том числе – современных тектонических процессов, определяющих сейсмическую опасность и непосредственно связанных с вопросами возведения ответственных сооружений в хо-

де экономического, научного и военного освоения региона.

Одним из наименее изученных в сейсмостектоническом отношении регионов Российской Арктики представляется полуостров Таймыр. Необходимо отметить, что сейсмостектонические и палеосейсмологические исследования, позволяющие получить информацию о ключевых параметрах сейсмогенерирующих структур, ранее проводились лишь на Кольском п-ове [Николаева, 2013; Зыков, 2015; Никонов, Зыков, 2017; и др.], в устье р. Лена и на самом севере Верхоянского горного сооружения [Имаев и др., 2000; 2018; Имаева и др., 2017]. Эти и проведенные нами (см. работы [Овсюченко и др., 2021; 2022]) исследования показывают, что в плане сейсмостектонической изученности побережье Арктики является перспективным объектом изучения с целью генерации новых научных знаний. Данная работа представляет результаты первых исследований активной тектоники на северо-востоке Таймыра, выполненных в 2020 г. в ходе Ком-

плексной экспедиции Северного флота и Русского географического общества.

НЕОСТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблемам геодинамики и истории тектонического развития Таймырской складчатой области посвящено значительное количество работ, в которых изложены различные и, нередко, противоречивые точки зрения. Наиболее известными в данной области являются труды Н.Н. Урванцева [1949], Ю.Е. Погребницкого [1971] и В.А. Верниковского [1996], в которых намечены основные черты геологического строения и истории развития всего региона. Основная особенность геологического строения Таймыра, отмеченная еще Н.Н. Урванцевым [1949], — обусловленность всех без исключения главнейших структур региональными разломами. Они образуют серию дугообразных пластин разновозрастных, в разной степени метаморфизованных магматических и вулканогенно-осадочных пород, надвинутых друг на друга в южном направлении. Наиболее древние протерозойские складчатые структуры сосредоточены на севере Таймырского полуострова, вдоль берегов Карского моря [Геология ..., 1961].

Вдоль вытянутой оси Таймырского полуострова протягивается горная цепь Бырранга. К северу горы переходят в прибрежную равнину с неоплейстоценовыми морскими террасами высотой до 200 м. Современное разновысотное положение террас маркирует молодое тектоническое подрастание горной цепи и опускание впадины озера Таймыр [Сакс, 1945; Вакар, 1952]. Скорости поднятия гор Бырранга для последних 30–40 тыс. лет оценены в пределах 1.1–4 мм/год [Антропоген Таймыра, 1982]. Для последних нескольких тысяч лет получены более высокие скорости — от 3.1 до 14 мм/год [Федоров и др., 2001]. Приведенные оценки касаются горной страны Бырранга в целом. Лишь в нескольких работах имеются сведения о молодых тектонических движениях по конкретным геологическим структурам Таймыра [Федоров и др., 2001; Гусев, 2015; Овсюченко и др., 2021]. В целом же, для полноценного построения моделей современной геодинамики, особенно в целях оценки сейсмической опасности, изученность проявлений современной тектонической активности крайне невелика.

Исследования выполнены на северо-восточном окончании гор Бырранга в районе бухты Марии Прончищевой (рис. 1). Здесь происходит резкое погружение горного массива Бырранга под четвертичные прибрежно-морские осадки при морской низменности. Горный массив сложен терригенно-угленосными отложениями среднекаменноугольно-пермского возраста, смятыми в складчатость линейного типа. Возникший в кон-

це триаса—начале раннего мела, горный массив был возрожден по пограничным разломам в новейшую, плиоцен-четвертичную эпоху [Проскурнин и др., 2013]. Оси складок, вдоль которых вытянуты основные водоразделы и речные долины, ориентированы в северо-восточном направлении и ортогонально обрываются вдоль предгорного уступа северо-западного простирания. Периодические трансгрессии моря с краткими периодами активизации ледниковой деятельности в четвертичном периоде привели к формированию мало мощного прерывистого рыхлого чехла на приморской низменности в районе бух. Марии Прончищевой.

Исследуемый район характеризуется определенной сейсмической активностью, тогда как почти весь остальной Таймыр по данным инструментальных сейсмологических наблюдений выглядит пассивным, что при высоких темпах молодых тектонических движений представляется обманчивым. Так, на северо-востоке Таймыра зарегистрированы сейсмические события в 1964, 1986, 1996 и 2015 гг. ($mb = 3.9–4.6$), а также Таймырское землетрясение 09.06.1990 г., имеющее максимальную для Таймыра магнитуду $mb = 4.9$ и эпицентральную интенсивность 6–7 баллов по шкале MSK-64 [Середкина, Козьмин, 2017].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексные геолого-геофизические исследования проведены с применением полевых и дистанционных геолого-геоморфологических (морфоструктурных) методов, аэрофотосъемки с последующим построением цифровой модели рельефа, а также геофизических методов изучения глубинного и приповерхностного строения Земли (методы георадарного профилирования и низкочастотного микросейсмического зондирования).

Очаги сильных и сильнейших землетрясений представляют собой устойчивые структуры в геологической среде — активные разломы [Солоненко, 1962; Трифонов и др., 1993; Рогожин, 2012; McCalpin, 2009]. Эта предпосылка лежит в основе методологии морфоструктурных исследований в целях изучения сейсмической опасности [Флоренсов, 1978; Burbank, Anderson, 2012; и др.]. Выявление активных разломов подразумевает исследование тектонических деформаций молодых, т.е. позднеоплейстоцен-голоценовых, отложений и форм рельефа [Трифонов и др., 1993]. Основная цель исследований — изучение и проследивание молодых форм рельефа и структурный анализ их тектонических деформаций.

В условиях сурового арктического климата и широкого развития криогенных процессов выявление молодых тектонических смещений и сле-

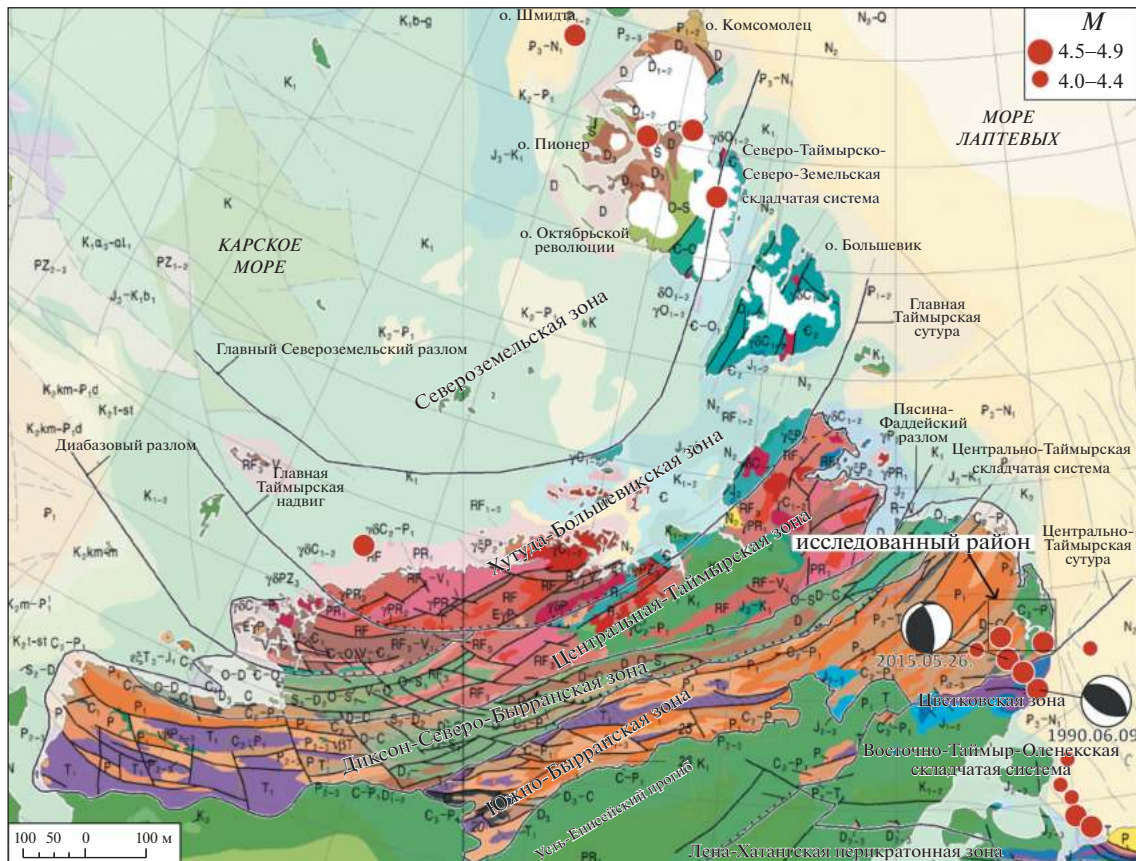


Рис. 1. Схематичная геологическая карта п-ова Таймыр [Проскурнин и др., 2020] с эпицентрами землетрясений и известными решениями механизмов очагов в нижней полусфере по данным работ [Середкина, Козьмин, 2017; Середкина, 2019].

дов древних землетрясений затруднено, с одной стороны, развитием многочисленных линейных форм рельефа, схожих с палеосейсмодислокациями. С другой – быстрой нивелировкой сейсмогенных нарушений рельефа весьма подвижным, сезонно оттаивающим склоновым чехлом, морозобойным трещинообразованием, а также постоянным перемещением обломков скальных пород в результате промерзания-оттаивания. Высокая подвижность приповерхностного слоя быстро маскирует как опорные геоморфологические уровни голоценового возраста, используемые для выявления и возрастной привязки тектонических деформаций, так и первичные структурно-текстурные признаки в слоистых осадках, маркирующих собой эти формы рельефа. В слоистых осадках широко развиты приповерхностные процессы, которые наряду с тектоническими, также нарушают первичное строение разреза молодых отложений. Перечисленные обстоятельства, наряду с небольшой мощностью сезонно оттаивающего слоя, сильно затрудняют применение стандартных методов изучения активной тектоники.

Использование различных геофизических методов позволяет расширить наши представления об особенностях глубинного строения слоистой геологической среды и отчасти преодолеть указанные выше проблемы изучения активной тектоники. При заложении геофизических профилей был использован основной принцип изучения активных разломов, который опирается, в первую очередь, на прослеживание опорных геоморфологических уровней – поверхностей выравнивания, речных и морских террас позднелейстоцен-голоценового возраста и слагающих их осадков. Профили были намечены на участках развития морских и речных отложений, маркирующих собой опорные геоморфологические уровни – морскую и речные террасы.

Разрез молодых отложений на участках тектонических деформаций форм рельефа изучен методом георадарного профилирования георадаром повышенной мощности “Лоза-В” [Koreikin et al., 1996; ООО “Компания ВНИИСМИ”, 2021], который применялся для решения различных задач в течение продолжительного времени [Koreikin et al., 2012; Воронин, 2015; Едемский и др., 2018;

2019; 2021; и др.]. Профилирование выполнено антеннами с центральной частотой 50 МГц и шагом по профилю 0.5 м. При интерпретации в первую очередь уделено внимание особенностям волновой картины, а именно – конфигурации осей синфазности отраженных волн; интенсивности осей синфазности (амплитуде отражений); протяженности осей синфазности и их непрерывности. Наличие резких изменений направления осей синфазности, их разрывы, могут свидетельствовать о нарушении субгоризонтальной структуры среды и наличия тектонических разрывов и смещений. При интерпретации учтены нарушения, смещающие несколько слоев разреза, что исключает влияние на волновую картину наклонных и вертикальных литологических разностей.

Глубинный геофизический разрез построен с применением метода микросейсмического зондирования (ММЗ), разработанного и усовершенствованного в ИФЗ РАН [Горбатиков, 2006; Жостков и др., 2015; Собисевич, Жостков, 2018; Нумалов и др., 2020]. При интерпретации микросейсмического зондирования определяется конфигурация геологической среды, состоящей из структур с повышенными и пониженными скоростями упругих волн, соответствующих пониженной и повышенной интенсивности микросейсмического фона, регистрируемого на поверхности. Таким образом, результат применения оригинального ММЗ имеет качественный характер, при этом известны подходы, позволяющие оценить скоростные характеристики исследуемой среды [Преснов и др., 2019].

Изначально метод микросейсмического зондирования разрабатывался как эмпирический, но при развитии он получил частичное теоретическое обоснование. Так в аналитической работе [Яновская, 2017] используя принцип сохранения потока энергии объяснены ключевые аспекты распространения волн Рэлея, связанные с изменением их амплитуды в зависимости от характера локальных неоднородностей и представлено критическое рассмотрение метода ММЗ, его физических основ и ограничений в применении к анализу глубоко залегающих структур (разломных зон) в связи с изменением разрешающей способности метода с глубиной. В работах [Горбатиков, Цуканов, 2011; Жостков, 2018] с помощью численного моделирования с применением суперкомпьютера получены оценки разрешающей способности ММЗ, а в работе [Цуканов, Горбатиков, 2020] показано, что этот метод обладает устойчивостью к микросейсмическому шуму, заключающейся в том, что даже существенное присутствие объемных волн в фоновом сигнале не приводит к сильным искажениям получаемого результата.

Метод микросейсмического зондирования обладает большим числом недостатков. В первую очередь он исходит из предположения об однородности и изотропности поля микросейсм, что, строго говоря, может не выполняться особенно вблизи береговой линии. Кроме того, разрешающая способность метода уменьшается с глубиной зондирования, что приводит к трудностям в определении нижних границ локальных включений [Яновская, 2017; Жостков, 2018]. Также при интерпретации данных этого метода можно допустить принципиальные ошибки, если, например, не учесть влияние рельефа [Жостков, 2019].

Однако ключевым преимуществом микросейсмического зондирования, позволяющим смириться со всеми его недостатками, является тот факт, что это единственный сейсмический метод позволяющий делать выводы о глубинном строении исследуемой среды с учетом временных и логистических ограничений, накладываемых характером проведения экспедиции.

В качестве измерительных станций использовались автономные геоакустические модули в арктическом исполнении [Собисевич и др., 2018; Sobisevich et al., 2020] на основе молекулярно-электронных преобразователей [Huang, Agafonov, 2013; Авдюхина и др., 2017]. Измерения проводились в 8 пунктах, эквидистантно расположенных вдоль линейного профиля общей длиной 875 метров, с накоплением данных не менее двух часов. Последующая обработка выполнена посредством авторского программного обеспечения [Преснов, 2019], реализованного в среде Matlab.

Отметим, что для перехода от частотной области к пространству глубин требуется дисперсионная кривая для волны Рэлея, однако ввиду крайне ограниченного времени проведения работ выполнить измерения, необходимые для определения этой зависимости, не представилось возможным, поэтому при построении геофизического разреза были использованы модельные данные [Преснов и др., 2020].

МОРФОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены на юго-западном побережье бухты Марии Прончищевой. Бухта представляет собой затопленную приустьевую часть долины (эстуарий) р. Северная у восточного подножия гор Бырранга (рис. 2). Здесь расстилается обширная предгорная низменность, занятая многочисленными озерами, бухтой и широкими, разложистыми долинами меандрирующих рек. Устья всех крупных рек на этой равнине подтоплены. Самый крупный эстуарий (бухта Марии Прончищевой) вытянут непосредственно вдоль подножия гор.

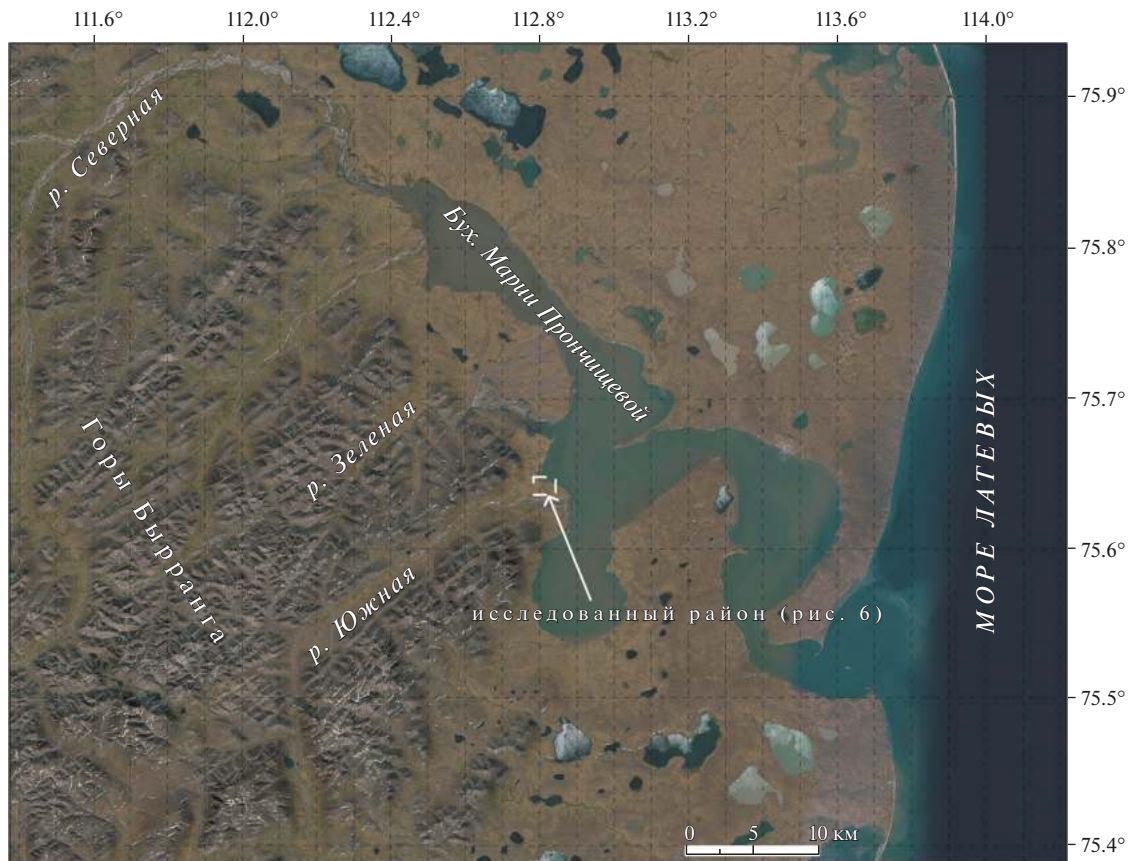


Рис. 2. Общая схема района бухты Марии Прончишевой. Основа – спутниковое изображение, полученное посредством Esri ArcGIS Desktop.

Граница между предгорной низменностью и горами имеет резкий характер. Здесь протягивается передовой уступ, вдоль которого условия озерно-болотно-морского и речного осадконакопления на равнине, не имеющей четко выраженных террас, сменяются крутыми горными склонами, террасированными речными долинами и наклонными предгорными пьедесталами. Горные склоны имеют чрезвычайную крутизну (до 50°), выпуклый профиль и покрыты сплошным покровом весьма подвижных каменных россыпей. В долинах рек количество террас постепенно увеличивается вниз по течению, до пересечения с уступом, где можно уверенно предполагать их локальное расщепление. В этом же направлении наблюдается и плавное увеличение высоты уступов террас. В долине р. Южная насчитывается не менее 4-х таких локальных уровней, укладываемых в пределы региональных 1-ой и 2-ой надпойменных террас (рис. 3). Террасы врезаны в склоны долин и предгорные пьедесталы – наклонные равнины, обрамляющие подножия горных склонов и вовлеченные в молодое тектоническое поднятие. Террасы здесь имеют цокольное строение – в них обнажается чехол размываемых

грубо сортированных аллювиально-пролювиальных отложений с примесью грубообломочного (солифлюкционного) материала. Образование локальных террас фиксирует этапы молодого подрастания гор, наиболее интенсивного вблизи передового уступа.

В районе устья р. Южная предгорная равнина нарушена пологой грядой высотой до 30 м, продолжающей передовой уступ в северо-западном направлении (рис. 4). Передовая гряда сложена песчано-галечным материалом морской террасы и обнаруживает признаки молодого подрастания (рис. 5). Долина ручья, некогда текущая прямо в бухту, испытывает резкий изгиб и огибает подрастающую гряду. Долина другого ручья, прорезающая гряду, имеет антецедентное строение. В пределах гряды она сужается до 10–20 м, и имеет крутые борта высотой до 7 м. В склонах долины насчитывается не менее 2-х террас – высокая пойменная и 1-ая надпойменная. В то же время, к югу от гряды долина выполаживается, днище ее расширяется до 50–60 м, высота бортов уменьшается до 1–2 м, а террасы снижаются до уровня поймы. По простиранию гряда испытывает резкий изгиб вдоль линеамента поперечной



Рис. 3. Горы Бырранга и террасированный предгорный пьедестал непосредственно южнее устья р. Южная. Стрелками показаны террасы. Вид на запад.

ориентировки, разделяясь на две эшелонированных складки.

Передовая гряда — асимметричная и имеет более крутой (до 15°) северо-восточный склон, обращенный к бухте. Вдоль этого склона протягивается уступ, распадающийся на несколько эшелонированных валов. В подножии уступа расположена плоская низменность, переходящая в бухту Марии Прончишевой. Низменность частично занята полностью заливаемыми во время приливов (до 1.5–2 м) лагунами, в которых отлагаются черные органогенные илы.

Привлекает внимание различная ориентировка и размеры сети полигональных форм микрорельефа на поверхности передовой гряды (рис. 6, рис. 7). Мерзлотные полигоны здесь образуют прямоугольники, разделенные сетью ортогональных трещин. Считается, что такие трещины формируются при морозобойном растрескивании, затем последовательно заполняются повторно-жильным льдом, который в условиях изменения температурного режима может оттаивать и образовывать ложбины и рвы [Суходровский, Гравис, 1976; Романовский, 1993; и др.]. Интересно, что по мере приближения к уступу размеры полигонов

уменьшаются. Вдоль уступа также происходит разворот преобладающего простирания полигонов. В узкой полосе, прилегающей к подножию уступа со стороны опущенного крыла, полигоны перекрыты солифлюкционным песчано-галечным чехлом, поступившим с растущего передового поднятия.

О молодых тектонических деформациях изученной предгорной гряды свидетельствуют: изгиб долины ручья; расщепление террас на своде изученной складки; резкая смена условий врезания долин на лагунно-болотное осадконакопление. Об этом же свидетельствуют и террасированные предгорные пьедесталы — участки бывшей предгорной равнины, вовлеченные в молодое тектоническое поднятие в поднятом крыле разломной зоны.

Предгорная гряда и уступ были изучены геофизическими методами — георадарным профилированием на глубину в первые десятки метров и микросейсмическим зондированием на глубину до 1 км (рис. 6, рис. 7).



Рис. 4. Передовой уступ гор Бырранга и продолжающая его подрастающая складчатая гряда в пределах предгорной низменности (на переднем плане). Вид на северо-запад непосредственно севернее устья р. Южная. Автор фотографии М.В. Ляменков.



Рис. 5. Передовая гряда в пределах предгорной низменности. Вид на северо-восток непосредственно севернее устья р. Южная.

ГЕОРАДАРНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

Профили 1, 3 проложены через пологий уступ на северо-восточном склоне гряды, сложенной песчано-галечными аллювиально-морскими осадками с солифлюкционным чехлом и сетью полигональных трещин. Профиль 2 пройден на простирации того же уступа в днище долины ручья на поверхности высокой пойменной террасы. Длина проложенных профилей составила от 194 до 257 м (рис. 8).

Верхняя часть георадарного разреза на всех профилях имеет довольно четкую стратификацию. Анализ полученной волновой картины показал наличие трех ярко выраженных георадарных комплексов (1), (2) и (3), граница между которыми проведена по линии изменения морфологии осей синфазности и их интенсивности [Владов, Старовойтов, 2004]. На основании анализа линий синфазности отраженного сигнала красными пунктирными линиями нанесены линии разрывов

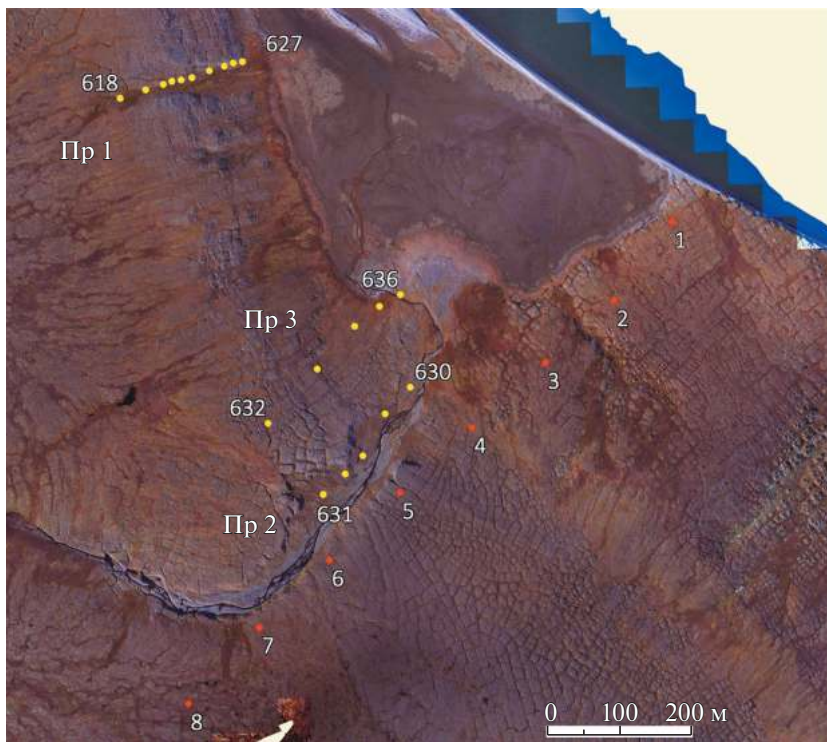


Рис. 6. Аэрофотоплан гряды в районе геофизических профилей. Желтые точки – георадар, красные – ММЗ.

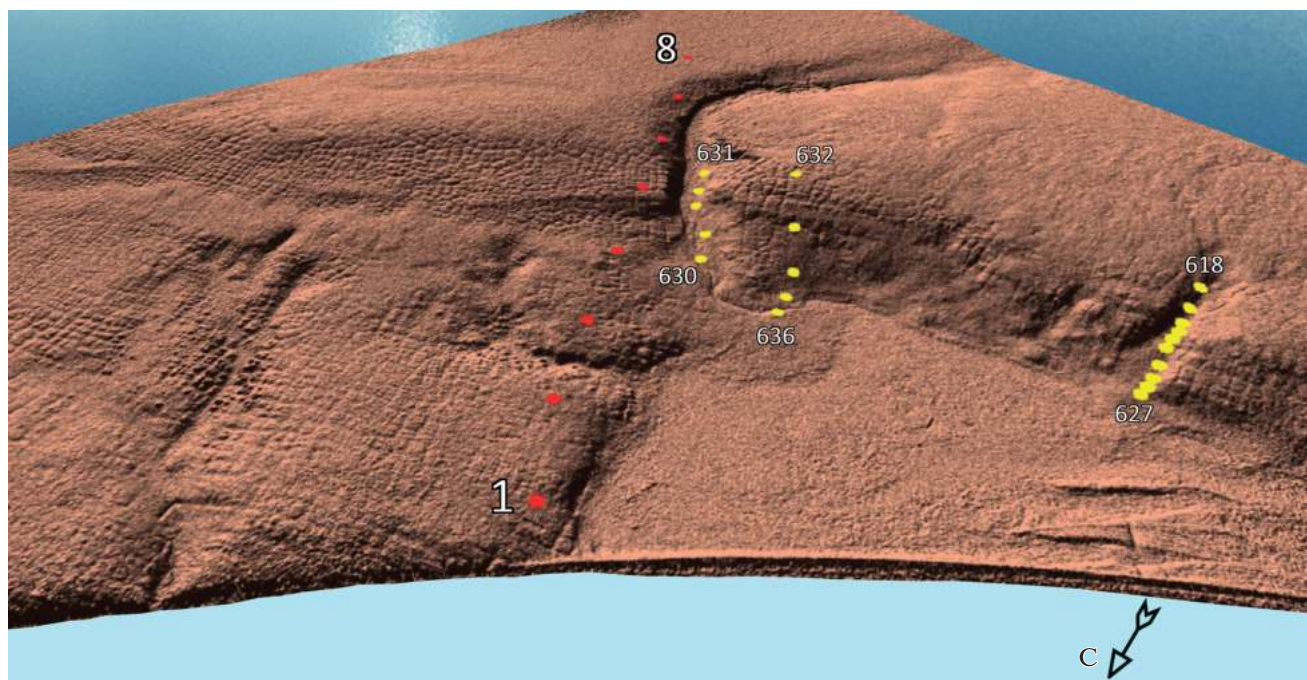


Рис. 7. Цифровая модель рельефа передовой гряды в районе пройденных геофизических профилей по данным аэрофотосъемки. Желтые точки – георадар, красные – ММЗ.

геологических слоев, которые совпадают с соответствующими нарушениями осей синфазности.

Георадарный комплекс (1) представляет собой солифлюкционные песчано-галечные отложе-

ния. Мощность данного комплекса колеблется от 3 до 6–8 м. Начиная с кровли георадарного комплекса (2) разрез приобретает характерный нерегулярный волновой рисунок отражений и пред-

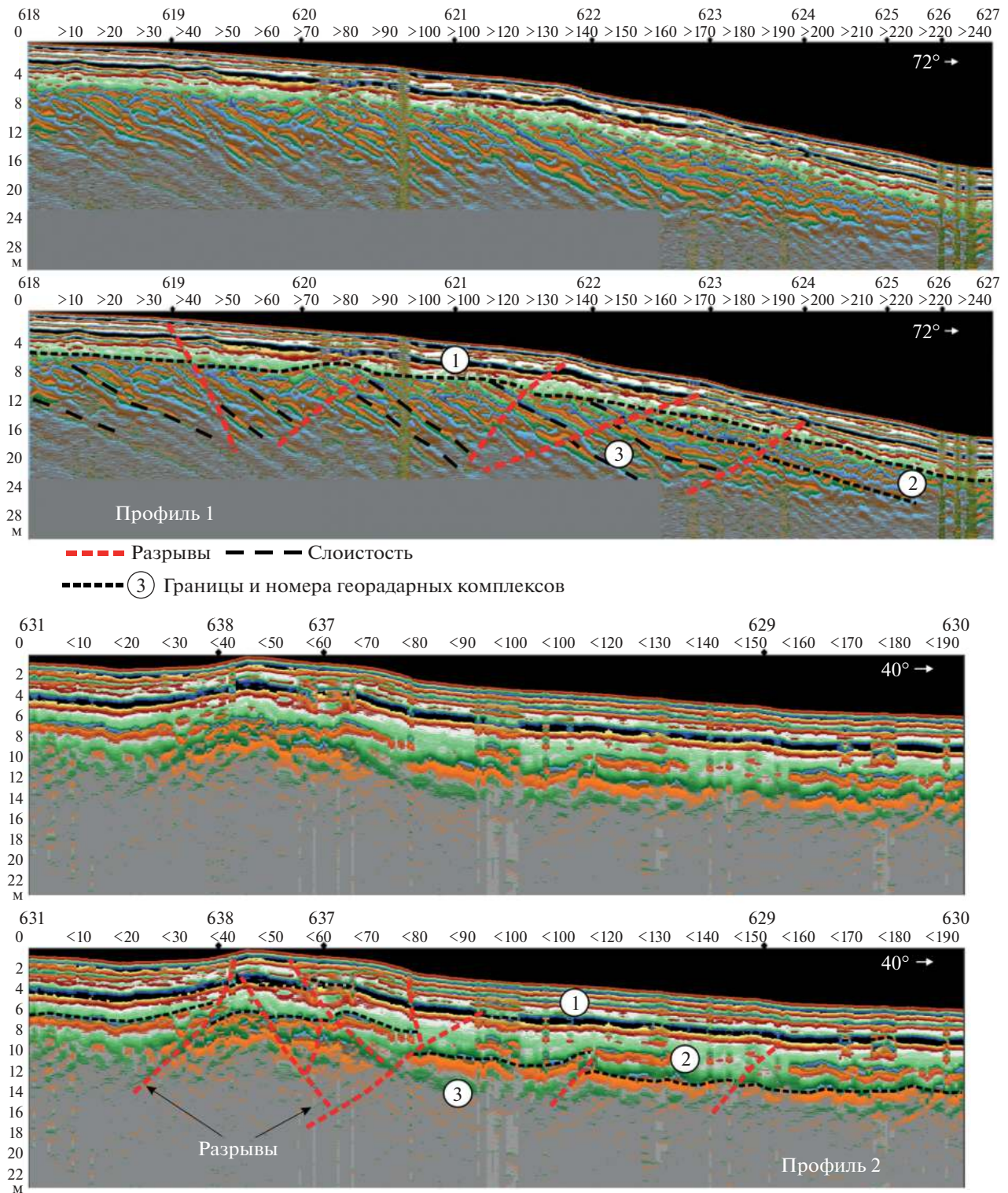


Рис. 8. Георадарные профили.

ставляет собой чехол грубо сортированных аллювиально-пролювиальных отложений с примесью солифлюкционного материала. Для комплекса характерно отсутствие регулярной структуры и наличие множественных локальных неоднород-

ностей, что может свидетельствовать о присутствии грубообломочного материала.

На профиле 1 солифлюкционный песчано-галечный чехол перекрывает полигонально-жильные структуры, которые визуально слабо прояв-

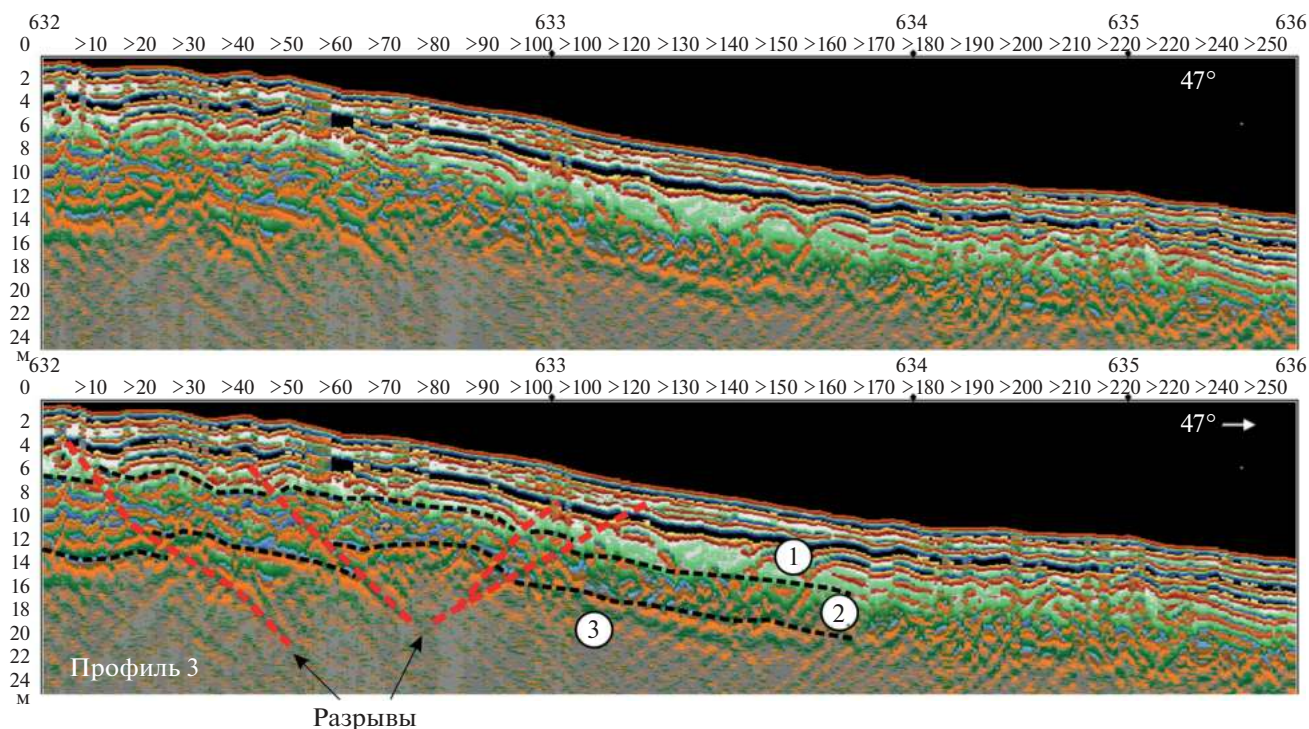


Рис. 8. Окончание

ляются, процесса оттаивания повторно-жильных льдов не наблюдается. По всей видимости, в данном месте ледяные морозобойные трещины со временем растаяли и заполнились вмещающими отложениями с формированием локальной слоистой структуры (псевдоморфозы). Именно от таких структур при зондировании можно получить отражения в виде наклонных прямых линий, угол которых в первую очередь зависит от шага измерений, и от скорости распространения зондирующего импульса в среде [Едемский и др., 2021]. На профиле 2 подобных структур не наблюдается.

Существенно отличается радиообраз полигонально-жильных структур на профиле 3. Здесь визуально четко просматривается полигональная структура с признаками периодического оттаивания погребенных ледяных жил глубиной до 0.5 м. Радиообраз таких структур наблюдается на протяжении всего профиля 3 в виде дугообразного изгиба линий синфазности и периодического пропадания сигналов\отражений в георадарном комплексе (1) от заполненных льдом криогенных трещин.

Для профиля 1, охватившего весь северо-восточный склон гряды, характерно наличие наклонно-слоистого георадарного комплекса (3) с характерным углом залегания $\sim 25^\circ$, линии синфазности которого выполаживаются к концу профиля. Наклонные слои четвертичных алювиально-морских отложений слагают северо-во-

сточное крыло антиклинальной складки, имеющей прямое выражение в рельефе в виде гряды. Слои нарушены разрывами преимущественно взбросовой морфологии. Наиболее ярко разрывно-складчатые структуры проявлены на профилях 2–3, где имеют и наиболее отчетливое выражение в рельефе в виде уступов. На профиле 1 разрывы объединяются в структурный ансамбль “складко-надвига”, нарушающего крутое крыло асимметричной антиклинальной складки. На профиле 2 разрывы и изгибы слоев образуют зону сжатия с вдавленной (рамповой) впадиной в осевой части. Эта сжатая, приразломная складка выражена и в самых молодых элементах разреза — чехле высокой пойменной террасы долины ручья, прорезающего растущую гряду.

МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Геофизический профиль был заложен вкрест простирания предгорной гряды. На вертикальном разрезе (рис. 9) красные области соответствуют породам с пониженной скоростью упругих волн, а синие — с повышенной (относительно среднего значения). Таким образом, отображаемые разными цветами области могут быть сложены как различными породами, так и однотипной, но структурно неоднородной (например, трещиноватая или сплошная). Диапазон значений относительной интенсивности микросейсмического поля составляет от -10 до 4 дБ, что соответ-

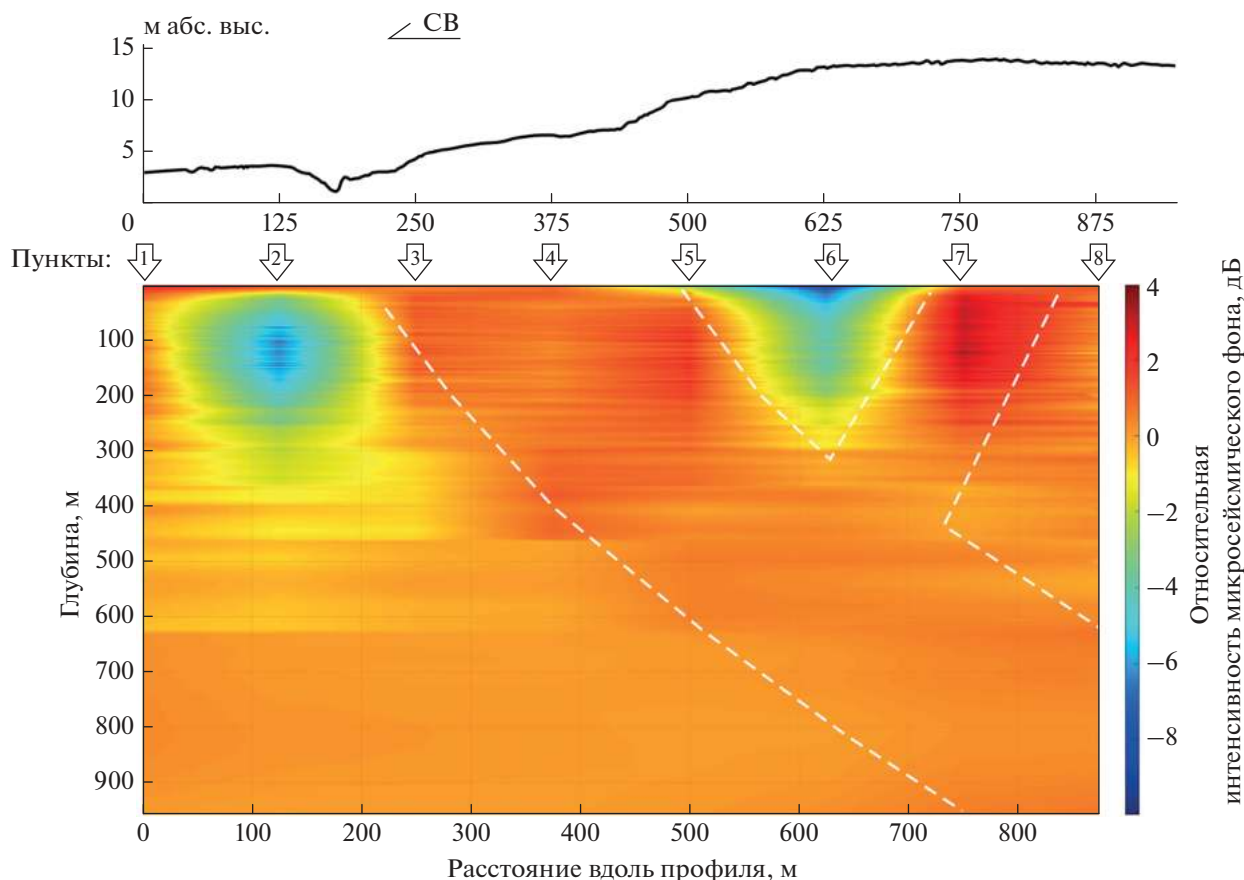


Рис. 9. Разрез ММЗ с профилем рельефа. Штриховыми линиями показаны границы предполагаемой разломной зоны.

ствует отклонению амплитуды поверхностной волны более, чем на 50% от среднего значения. Это уверенно свидетельствует о наличии существенного нарушения строения среды в геофизическом разрезе. Из-за небольшой длины профиля сложно различить какие-либо структуры на глубинах, превышающих 500 м, что согласуется с областью применимости используемого подхода. Тем не менее, первые сотни метров демонстрируют ярко выраженные локальные неоднородности геофизической среды.

Подножие уступа на северо-восточном склоне гряды в разрезе по профилю ММЗ соответствует наклонной зоне повышенной структурной неоднородности, которая выделена по положительным значениям относительной интенсивности микросейсмического фона, и контрастирует с окружающими отрицательными значениями. Такое положение зоны пониженной скорости упругих волн вписывается в геолого-геоморфологические представления и существенно уточняет данные о строении разломной зоны в недрах. По данным ММЗ можно полагать, что зона разлома имеет падение в юго-восточном направлении, под горы Бырранга, фиксируя крупный вбросо-

надвиг, выраженный в рельефе привзбросовой антиклинальной грядой. Слабая контрастность разреза на глубинах более 500 м позволяет допускать и другие варианты интерпретации. Сделанный вывод можно рассматривать как постановку задачи в районе, заслуживающем пристального внимания для решения ряда важнейших проблем современной геодинамики Таймыра в целом.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основываясь на результатах полевых наблюдений по данным дистанционных исследований составлена схема активных геологических структур района (рис. 10).

К северу от исследованного участка, в нижнем течении р. Зеленой, по дистанционным данным изучена предполагаемая активизированная антиклинальная складка. Река, ранее впадавшая в бухту Марии Прончишевой по веерообразно расходящейся серии проток, изменила свое течение на 70°–75°, выработав новое, единое русло. В местах коленообразных изгибов, ставших точками перестройки гидросети, путь древнему руслу преградили две вытянутых, пологих возвышенности.

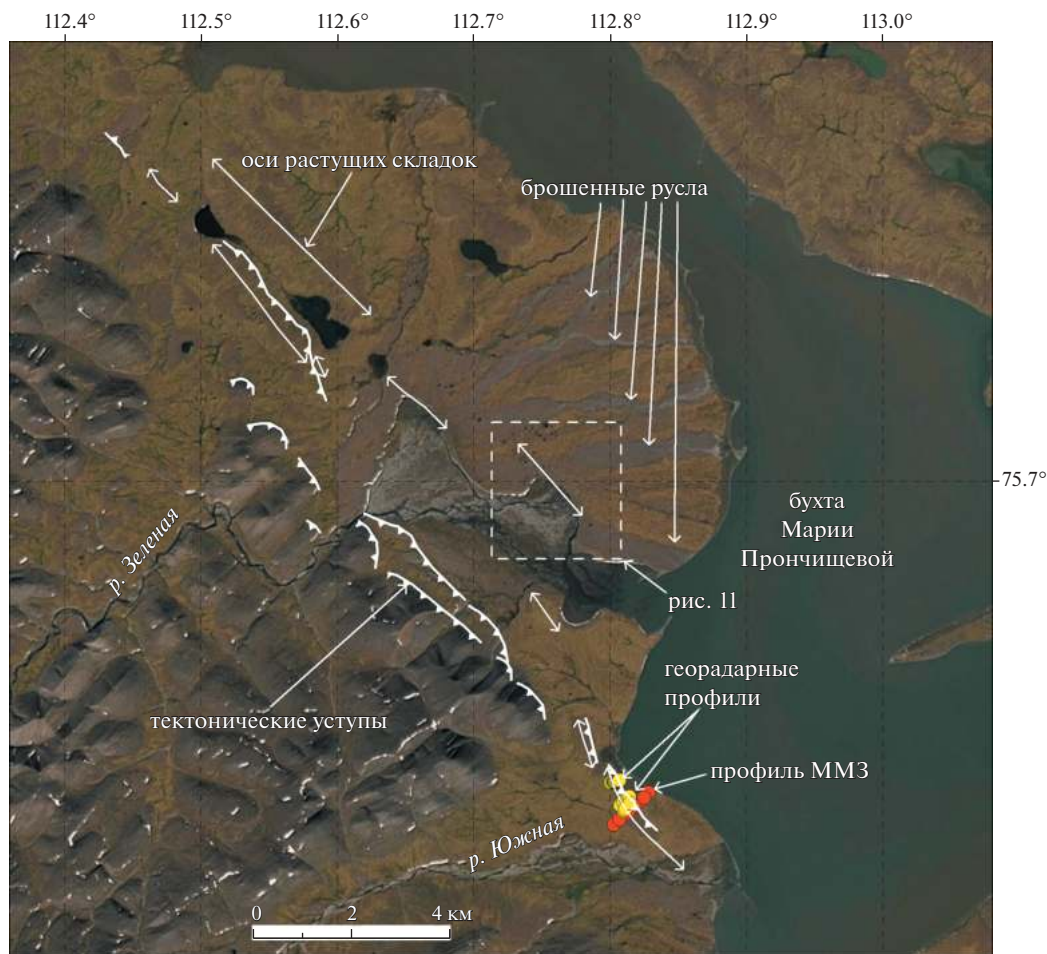


Рис. 10. Схема активных геологических структур района по дистанционным и полевым данным.

Они имеют овальную в плане форму и покрыты многочисленными трещинами, ограничивающими полигональные положительные микроформы рельефа (мерзлотные полигоны). Вероятнее всего, большинство из трещин представляет собой вытаявающие/растягившие трещины, заполненные или некогда заполненные повторно-жильным льдом. В то же время трещины образуют два небольших ареала правильной овальной формы. Протяженность длинной оси ареалов — до 1.8 км; короткой — до 1 км. Ареалы четко оконтуривают локальные зоны активизации современных геологических процессов, вдоль которых происходят резкие перестройки течения реки.

Для юго-восточной локальной активизированной зоны по результатам дешифрирования составлены схемы трех основных морфологических элементов: открытых (без растительного покрова) трещин; закрытых (заросших) трещинами (рис. 11). Длина закрытых трещин достигает 150 м; ширина — до 2–3 м. Полигоны достигают первых десятков метров в поперечнике, представляя со-

бой сложные многоугольные фигуры, покрытые болотной растительностью.

Размеры открытых трещин и их концентрация распределены в пространстве крайне неравномерно. Они максимальны на участке, вытянутом вдоль осевой линии овальной области, заполненной широкими открытыми трещинами. Ориентировка наиболее широких трещин меняется, образуя две основные системы — овально-концентрическую и осевую. Вдоль осевой линии вытянута эшелонированная система открытых трещин шириной до 20 м. Длина наиболее ярко выраженного участка — не менее 500 м. К юго-востоку трещины оказались залиты рекой — здесь образовалась эшелонированная серия затонов общей длиной около 1 км. Суммарная длина эшелонированной системы трещин — не менее 1.6 км. Ориентировка эшелонированных трещин субширотная, тогда как общая ориентировка системы — северо-западная. Таким образом в плановом строении системы трещин отчетливо проявлен тектонический структурный рисунок, характерный для зон горизонтального сдвига [Sylvester, 1988].

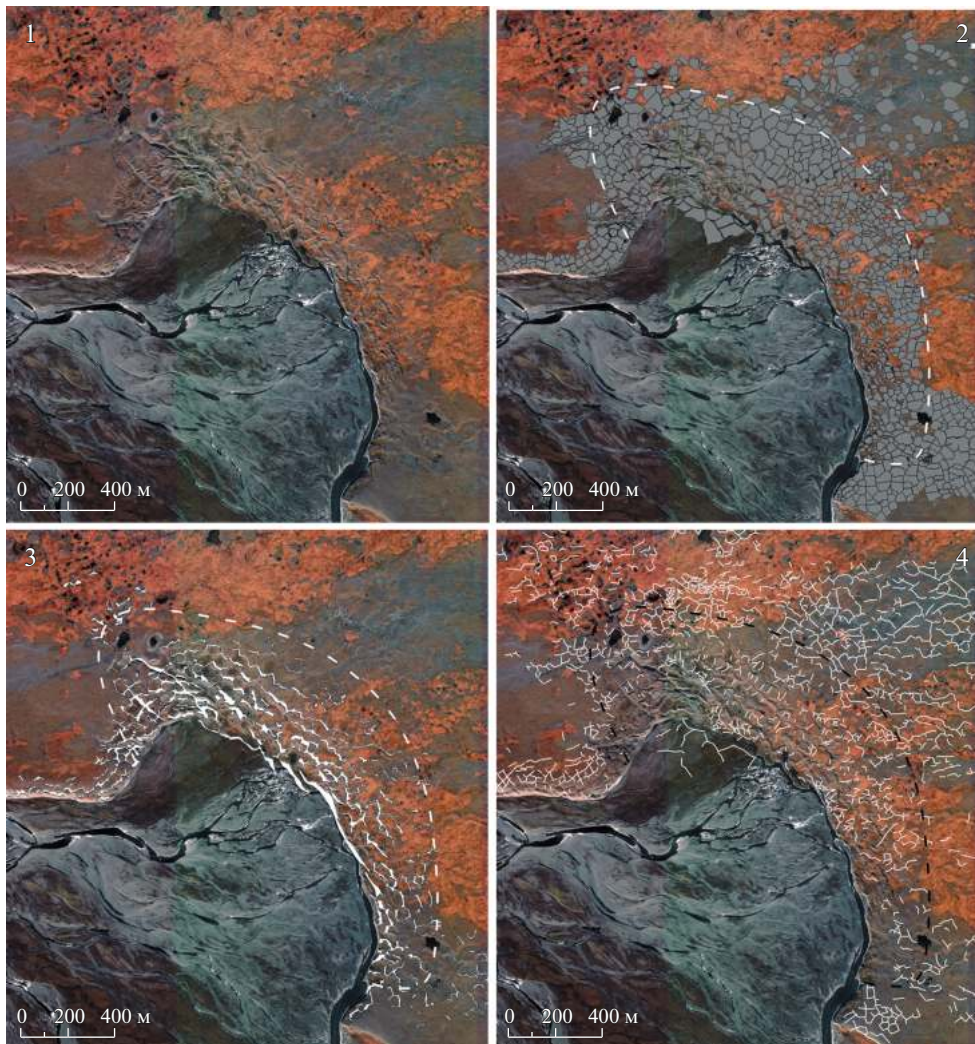


Рис. 11. Элементы строения локальной активизированной зоны по дистанционным данным. Положение см. на рис. 10. Контуры активизированной зоны показаны штриховой линией: 1 – спутниковое изображение (получено посредством Esri ArcGIS Desktop); 2 – мерзлотные полигоны; 3 – открытые трещины; 4 – закрытые трещины.

В осевой зоне локального ареала также наблюдаются минимальные количество и размеры положительных полигональных микроформ рельефа, т.е. максимальное вытаивание повторно-жильных льдов. Полигоны в этой зоне обнаруживают максимальную стадию деградации и представляют собой изометричные бугры – байджарахи. Считается, что байджарахи являются остатками грунта, слагающего ядро мерзлотного полигона и ограниченного оттаявшими ледяными жилами, т.е. вытаивающими блоками [Романовский, 1993]. В данном случае максимум вытаивания межтрещинных блоков прямо связан с осью локальной активизированной структуры, имеющей признаки приразломной антиклинальной складки.

Большая протяженность (минимум 1.6 км) и признаки эшелонированного строения позволяют полагать, что эшелонированная система ши-

роких трещин имеет первично сейсмотектоническое происхождение, а полигональные трещины вторичны и наложились на резко подросшую складку, вдоль оси которой возник сдвиговый разрыв. Если это так, то в результате подрастания, эта и соседняя складки перегородили путь реке, которая была вынуждена изменить свое течение на 70° – 75° . Выполнить полевые исследования здесь не удалось. Датировка события остается делом будущего. Исходя из хорошей сохранности деформаций можно предполагать, что событие произошло несколько сотен лет назад.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом, разрывы молодых отложений, выявленные по данным георадарного профилирования, изгиб долины ручья, расщепление террас на

своде изученной складчатой предгорной гряды, ее приразломное положение по данным ММЗ и другие геоморфологические признаки свидетельствуют о молодом тектоническом подрастании приразломной передовой гряды.

Передовая гряда обнаруживает и другие признаки молодой активизации. Заслуживает пристального внимания различная ориентировка, размеры и степень вытаивания полигональных форм микрорельефа в различных морфоструктурных обстановках района передовой гряды. Обычно, при заложении полигонов, ориентировка морозобойных трещин приспособляется к первичным неровностям в очертаниях рельефа. Такие неровности становятся ограничивающими поверхностями при распределении напряжений в мерзлом грунте. В данном случае можно полагать, что упорядоченная структура полигональной сети в значительной мере отражает поле молодых тектонических напряжений. Уменьшение размеров полигонов по мере приближения к уступу и вдоль оси локальной складки, по всей видимости, отражает увеличение тектонической раздробленности. Разворот же преобладающей ориентировки полигонов вдоль уступа может быть связан со сменой ориентировки осей поля напряжений в различных локальных морфотектонических обстановках (основные из них – свод растущей складки и разные крылья приразломного уступа).

Обсуждаемые особенности заслуживают пристального внимания и проведения специальных исследований в связи с тем, что они могут быть диагностическим признаком резких, сейсмотектонических деформаций земной поверхности при сильных землетрясениях и отражать хронологию событий. Можно предположить, что в очаговых зонах сильных землетрясений аналогичное сходство обнаруживает хронология оттаивания-нарастания повторно-жильных льдов с режимом сейсмотектонических активизаций. В качестве примера можно привести разную степень вытаивания мерзлотных полигонов в районе предполагаемой локальной складки (рис. 11) в зависимости от морфотектонической обстановки.

В хорошо изученной Байкальской рифтовой зоне, давно известной сильными землетрясениями и также расположенной в зоне развития многолетнемерзлых пород, установлено, что развитие термокарста и термоэрозии может произойти в результате подземных толчков даже незначительной силы как при землетрясении, так и после него [Лапердин, Имаев, 2010]. В частности, в результате Муйского землетрясения 1957 г. с $M = 7.6$ многолетнемерзлые грунты в Муйской впадине оказались разбиты в плане на многоугольные блоки-соты (полигоны) различной величины. Общая ширина зоны разрушения составила 500 м, длина 1000 м. Подобные формы рельефа сформирова-

ровались после Мондинского землетрясения 04.04.1950 г. ($M = 7$), а также в эпицентре Ханийского землетрясения 2 ноября 1958 г. ($M = 5.5-6.5$, $I = 8$ баллов).

В морфотектоническом отношении рассмотренные гряды на предгорной низменности, имеющие перечисленные характерные признаки, представляют собой передовые поднятия (форберги), отражающие тектоническую экспансию горной страны в сторону прилегающей равнины. Такой сценарий горообразования подробно описан Н.А. Флоренсовым [Флоренсов, 1978] под названием “гобийского” или “глыбово-сводового” механизма орогенеза, характерного для Центрально-Азиатского подвижного пояса. “Гобийский” сценарий заключается в экспансии гор за счет предгорных прогибов, втягивании их в поднятие и миграции прогибов в сторону от поднятий. Механизм структурообразования при этом заключается в сочетании горизонтальных и вертикальных перемещений горных цепей с надвигом гор на впадины по краевым взбросо-надвигом, горизонтальными смещениями по сдвигам в осевой части хребтов, их сводовым изгибом и опусканием клиновидных блоков. Все эти разновидности деформаций возникли одновременно при катастрофическом Гоби-Алтайском землетрясении 1957 г. с $M_s = 8.1$ [Гоби-Алтайское землетрясение, 1963]. Активные разрывно-складчатые структуры – передовые растущие складки (форберги) и надвиги в подножии горных хребтов – являются концентраторами современных тектонических напряжений и очагами сильных землетрясений.

В районе бухты Марии Прончищевой землетрясения зарегистрированы сетью стационарных сейсмологических станций. В отличие от большинства землетрясений Лаптевоморской рифтовой системы, которые характеризуются условиями растяжения и сбросовыми смещениями в очагах [Имаева и др., 2017; Seredkina, Melnikova, 2018], очаги Таймырских землетрясений 1990 и 2015 гг. в районе бухты Марии Прончищевой имеют взбросо-сдвиговые механизмы (см. рис. 1). Взбросо-надвиговый характер смещений с признаками сдвига вдоль изученного передового уступа и приразломной передовой гряды также свидетельствуют об условиях субгоризонтального северо-восточного тектонического сжатия в сочетании со сдвигом.

Таким образом, несмотря на сжатые сроки работ на исследуемой территории, представляется возможным отметить, что Таймырская сейсмотектоническая зона обнаруживает как пространственную, так и генетическую обособленность. Она имеет индивидуальную модель позднекайнозойской геодинамической эволюции и современного сейсмотектонического режима, резко отлич-

ную от прилегающей с востока Лаптевоморской рифтовой зоны. Структурная направленность современного сейсмотектонического режима Таймырской сейсмотектонической зоны проявляет сходство с условиями Центрально-Азиатского сейсмического пояса. Подобное сходство, вероятно, проявляется и в магнитудном уровне возникающих землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вдоль восточного подножия гор Бырранга нами выявлена и изучена широкая зона активных разрывно-складчатых деформаций, укладываемая в структурный ансамбль “складко-надвига”. В результате сжатых исследований нами не обнаружены хорошо изученные в других климатических условиях и ставшие классическими [Рогожин, 2012; McCalpin, 2009; Burbank, Anderson, 2012], прямые признаки сильных сейсмических сотрясений прошлого. Возможно, они будут выявлены при более обстоятельных исследованиях. И все же, использованный комплекс методов показал высокую эффективность в условиях Арктики и позволяет сделать некоторые выводы. Можно обоснованно полагать, что выявленная разрывно-складчатая структура демонстрирует тектонические деформации возрастом в первые сотни – тысячи лет и представляет собой потенциальный очаг сильных землетрясений. Общая кинематика смещений – взбросо-надвиговая с признаками сдвига. Четко выраженный структурный стиль молодых тектонических деформаций обнаруживает прямое сходство с хорошо изученными структурными аналогами Центрально-Азиатского сейсмического пояса. Оценка силы и вероятности возможного здесь землетрясения – дело будущих, более детальных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Научная программа выполнена в рамках работ по Государственному заданию ИФЗ РАН, георадарные исследования выполнены при поддержке гранта РФ № 22-12-00083.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность директору экспедиционного департамента Русского географического общества Сергею Анатольевичу Чечулину, научному руководителю экспедиции от Северного флота полковнику Сергею Борисовичу Чуркину, а также капитану ледокола “Илья Муромец” Виктору Александровичу Осипову и всей корабельной команде, выполнившей свою работу на самом высоком уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропоген Таймыра / Н.В. Кинд, Б.Н. Леонов (ред.). М.: Наука. 1982. 184 с.
- Авдюхина С.Ю., Антонов А.Н., Егоров И.В., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Шабалина А.С. Широкополосная сейсмическая станция для сейсморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков. Сейсмические технологии, 2017. Материалы научно-практической конференции. ООО “Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова”. 2017. С. 64–67.
- Вакар В.А. Геологическое строение центральной части Восточного Таймыра. Труды НИИГА. Т. XXXIV. М.: изд-во Главсевморпути. 1952. 118 с.
- Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск: изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ. 1996. 202 с.
- Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1083–1107.
- Воронин А.Я. Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара “ЛОЗА-В” // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 106–128.
- Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. М.: изд-во МГУ. 2004. 153 с.
- Геология СССР. Том XV. Красноярский край. Часть I. Геологическое описание / Ю.А. Кузнецов, Ю.В. Лучицкий (ред.). М.: Недра. 1961. 815 с.
- Гоби-Алтайское землетрясение / Флоренсов Н.А., Солоненко В.П. (ред.). М.: изд-во АН СССР. 1963. 391 с.
- Горбатилов А.В. Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. 2006. № 7.
- Горбатилов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Изучение возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.
- Гусев Е.А. Неотектонические нарушения новейшего чехла в районе Енисейского залива Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 3(105). С. 5–14.
- Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия Науки о Земле. 2015. № 2(26). С. 11–19.
- Жостков Р.А. Совершенствование некоторых методов сейсморазведки с помощью данных о рассеянии волн Рэлея на рельефе // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 11. С. 1555–1559.
- Жостков Р.А. Восстановление неоднородностей среды при микросейсмическом зондировании вдоль криволинейной поверхности // Акустический журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 708–720.
- Зыков Д.С. Геоморфологические признаки проявления горизонтальной компоненты неотектонических движений вдоль границы Балтийского щита и Западно-Арктической платформы (Мурманская область) // Геоморфология. 2015. № 3. С. 27–38.

- Едемский Д.Е., Попов А.В., Прокопович И.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В.* Опыт георадиолокационного зондирования почвенно-пирокластического чехла юго-восточной части о. Матуа (Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 4. Вып. 40. С. 69–81.
- Едемский Д.Е., Попов А.В., Прокопович И.В., Садыков Т.Р., Блохин Е.К., Каспари Д.* Применение геофизических методов при обследовании периферии кургана Тунгуг-1 // Международный журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 11. С. 40–48.
- Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Овсяченко А.Н.* Георадиолокационное зондирование отложений в пределах градирующего полигонального микрорельефа в Арктике // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 5 С. 55–69.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмоструктура Якутии. М.: Геос. 2000. 227 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Овсяченко А.Н., Колодезников И.И.* Неотектоника Хараулахского сектора прибрежно-шельфовой зоны моря Лаптевых // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 7. С. 1014–1031.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельникова В.И., Середкина А.И., Маккей К.Д., Аиурков С.В., Смекалин О.П., Овсяченко А.Н., Чипизубов А.В., Сясько А.А.* Сейсмоструктура северо-восточного сектора Российской Арктики. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2017. 136 с.
- Лапердин В.К., Имаев В.С.* Опасные геологические процессы в зоне Байкальского рифта и сопредельных территорий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37. № 1. С. 40–55.
- Николаева С.Б.* Свидетельства сейсмических событий на побережье Мурмана в позднеледниковье и голоцене // Известия РГО. 2013. Т. 145. Вып. 4. С. 53–65.
- Никонов А.А., Зыков Д.С.* О признаках мощных землетрясений в восточном секторе Мурманской зоны (Линия Карпинского). Тр. Ферсмановской научной сессии Геол. института КНЦ РАН. Вып. 14. 2017. С. 143–148.
- Нумалов А.С., Преснов Д.А., Жостков Р.А.* Изучение ошибки измерений в методе микросейсмического зондирования // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2020. № 5. С. 2050801.
- Овсяченко А.Н., Собисевич А.Л., Ляменков М.В., Жостков Р.А.* Новые данные о сильных землетрясениях в Арктической зоне Российской Федерации по результатам геолого-геофизических исследований на острове Белуха // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 1. С. 60–64.
- Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е., Жостков Р.А.* Активная тектоника Восточной Арктики: новые данные геолого-геофизических исследований на мысе Фомы (запад острова Врангеля) // Геотектоника. 2022. № 3. С. 3–19. ООО “Компания ВНИИСМИ” [Электронный ресурс]. URL: <http://www.geo-radar.ru/> (дата обращения: 05.03.2021).
- Преснов Д.А., Жостков Р.А., Котов А.Н.* Исследование связи амплитуды фонового сейсмического шума с параметрами среды (на примере грязевого вулкана Джау-Тепе). Сборник научных материалов двадцатой молодежной научной школы по геофизике. Пермь: ГИ УрО РАН. 2019. С. 157–161.
- Преснов Д.А.* Программа для обработки данных по методике модифицированного микросейсмического зондирования. Свидетельство о регистрации прав на ПО № 2019665880 от 2 декабря 2019 г.
- Преснов Д.А., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Белобородов Д.Е., Дударов З.И., Долов С.М.* Новые данные о глубинном строении грязевого вулкана Джау-Тепе // Вулканология и сейсмология. 2020. № 3. С. 34–45.
- Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Тарноградский В.Д., Багаева А.А., Межубовский В.В., Трофимов В.Р.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Таймырско-Североземельская. Лист S-49 – Хатангский залив. Объяснительная записка. СПб.: Карт. фабрика ВСЕГЕИ. 2013. 275 с.
- Проскурнин В.Ф., Багаева А.А., Шнейдер Г.В., Петрушков Б.С., Проскурнина М.А.* Полуостров Таймыр. Тектоностратиграфический атлас Арктики / О.В. Петров, М. Смелор (ред.). СПб.: ВСЕГЕИ. 2020. С. 105–108.
- Погребницкий Ю.Е.* Палеотектонический анализ Таймырской складчатой системы. Л.: Недра. 1971. 284 с.
- Рекант П.В., Гусев Е.А.* Признаки новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине по данным сейсмоакустического профилирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2(82). С. 85–94.
- Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмоструктуры. М.: ИФЗ РАН. 2012. 340 с.
- Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: изд-во МГУ. 1993. 336 с.
- Сакс В.Н.* К вопросу о молодых тектонических движениях на севере Сибири // Докл. АН СССР. 1945. Т. XL–VII. № 8. С. 596–599.
- Середкина А.И.* Очаговые параметры землетрясений восточного сегмента Арктико-Азиатского сейсмического пояса. Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ РАН. 2019. С. 240–244.
- Середкина А.И., Козьмин Б.М.* Параметры Таймырско-го землетрясения 1990 г. // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 2. С. 214–217.
- Собисевич А.Л., Жостков Р.А.* Об учете влияния рельефа в методе микросейсмического зондирования // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 4. С. 438–441.
- Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Асафонов В.М., Собисевич Л.Е.* Вмораживаемый автономный геоакустический буй нового поколения // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 1. С. 25–34.
- Солоненко В.П.* Определение эпицентральных зон землетрясений по геологическим признакам // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1962. № 11. С. 58–74.
- Суходровский В.Л., Гравис Г.Ф.* Мерзлота и рельеф. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Проблемы экзогенного рельефообразования. Книга I. М.: Наука, 1976. С. 189–263.
- Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В.* Изучение и картирование активных разломов. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Т. 1. М.: ОИФЗ РАН. 1993. С. 196–206.
- Урванцев Н.Н.* Таймырская складчатая зона // Бюлл. тех. информ. Норильск. 1949. № 3–4. С. 45–52.

- Федоров Г.Б., Антонов О.М., Большаков Д.Ю. Особенности режима современных тектонических движений Центрального Таймыра // Известия РГО. 2001. Т. 133. Вып. 1. С. 76–81.
- Флоренсов Н.А. Очерки структурной геоморфологии. М.: Наука. 1978. 283 с.
- Цуканов А.А., Горбатилов А.В. Исследование влияния вклада объемных волн на результат применения метода микросейсмического зондирования // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 2. С. 198–205.
- Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. № 6. С. 18–23.
- Burbank D.W., Anderson R.S. Tectonic geomorphology (2nd edition). Chichester, Wiley-Blackwell. 2012. 454 p.
- Huang H., Agafonov V.M. Molecular electric transducers as motion sensors: A review // Sensors. 2013. V. 13. № 4. P. 4581–4597.
- Kopeikin V.V., Edemsky D.E., Garbatsevich V.A., Popov A.V., Reznikov A.E., Schekotov A.Yu. Enhanced Power Ground Penetrating Radars // Proc. 6th Internat. Conf. on GPR. Sendai, Japan. 1996. P. 152–154.
- Kopeikin V.V., Morozov P.A., Edemskiy F.D., Edemskiy D.E., Pavlovskii B.R., Sungurov Yu.A. Experience of GPR application in oil-and-gas industry. Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, Shanghai, China. 2012. V. 3. P. 817–819.
- McCalpin J.P. Paleoseismology. Elsevier. 2nd edition. 2009. 613 p.
- Seredkina A.I., Melnikova V.I. New data on earthquake focal mechanisms in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt // J. Seismology. 2018. V. 22. № 5. P. 1211–1224.
- Sobisevich L.E., Agafonov V.M., Presnov D.A., Gravirov V.V., Likhodeev D.V., Zhostkov R.A. The advanced prototype of the geohydroacoustic ice buoy // Sensors. 2020. V. 20(24). P. 7213.
- Sylvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Amer. Bull. 1988. V. 100. P. 1666–1703.

Active Tectonics of North-Eastern Taimyr (Byrranga Mountains) and Questions of Seismo-Tectonic Regionalization of the Russian Arctic

A. N. Ovsyuchenko^{a, *}, R. A. Zhostkov^a, D. E. Edemskii^b, A. L. Sobisevich^a,
A. I. Sysolin^a, and D. A. Presnov^a

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia

^bPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, 108840 Russia

*e-mail: ovs@ifz.ru

Abstract—In this paper, we present the first results of complex geological and geophysical studies of active tectonics in the northeast of Taimyr, carried out during the expedition of the Northern Fleet and the Russian Geographical Society in 2020. At the foot of the Byrranga Mountains, a wide zone of active fault-folded tectonic deformations was identified and studied. The general kinematics of displacements is reverse-thrust with signs of shear. The structural style of young tectonic deformations bears a direct resemblance to well-studied structural analogues of the Central Asian seismic belt. The Taimyr seismotectonic zone reveals both spatial and genetic isolation. It has an individual model of the Late Cenozoic geodynamic evolution and modern seismotectonic regime, which differs sharply from the Laptev Sea rift zone adjacent to the east. A complex of geological and geophysical methods has shown high efficiency of application in the Arctic to identify young fault-fold structures, which are potential sources of strong earthquakes.

Keywords: Taimyr, Byrranga mountains, active tectonics, morphotectonics, earthquake source, seismic hazard, microseismic sounding, ground penetrating radar