Промежуточный отчет 2022 по Проекту РНФ 22-17-00049

Неотектоника и активная тектоника северной части Центральной Азии

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТА

Заявленный в проекте план работы научного исследования на отчетный период

В первый (2022) год реализации проекта будут проанализированы все опубликованные материалы по тематике проекта; предварительно исследована структура новейших поднятий и их ограничений методами структурной геоморфологии с применением дистанционных данных (моделей рельефа, созданных на базе SRTM с 3" разрешением на местности, и детальных космических изображений). Будут обработаны материалы полевых работ предыдущих двух лет по неотектонике и активным разломам хребта Танну-Ола, бортов Тувинской и Тункинской впадин и северного борта впадины Убсу-Нур. Будет изучена скоростная структура Хангайского внутримантийного плюма и его Хэнтэйского ответвления на основе различных баз сейсмотомографических данных глобальной сети. Будет построена 3D модель этого плюма, которая будет сопоставлена с 3D моделями Тибетского внутримантийного плюма, Эфиопско-Афарского и Тихоокеанского суперплюмов, построенными по тем же данным. Будут выяснены соотношения Хангайского плюма со строением мантии Забайкалья. Планируется изучение кинематики и палеосейсмичности Мондинского разлома Тункинской системы впадин.

Планируется также проведение полевых работ в Монголии, где будут исследованы разрезы новейших отложений впадин, примыкающих к Хангайскому нагорью с запада, новейшая структура Хангайского нагорья и поднятых обрамлений указанных впадин на ключевых участках, а также активные разломы восточного окончания Хангайской зоны, зоны Цэцэрлэгского разлома и ограничений Хубсугульского (в том числе, проявления землетрясения 2021 г. с магнитудой Мw=7), Дархатского и Бусийнгольского грабенов.

В Туве планируется исследовать активные разломы Центрально-Тувинской системы межгорных впадин (Кызыльской, Улугхемской, Хемчикской). В случае, если территория Монголии будет закрыта из-за эпидемиологических ограничений, полевые работы будут полностью перенесены в Туву и соседние территории, где будут исследоваться элементы новейшей структуры Тувы, активные разломы Тувы широтного и СВ простираний, их соотношения с субширотными разломами Байкало-Мондинской и Тункинской зон и субмеридиональными активными разломами.

Заявленные научные результаты на конец отчетного периода

1. Сданная в журнал для публикации статья Овсюченко А.Н., Бутанаева Ю.В. и др. «Локализация очага сильного исторического землетрясения в Центральной Туве с использованием фольклорно-исторических и палеосейсмологических данных».

2. Сданная в журнал для публикации статья Соколова С.А., Зеленина Е.А., Бутанаева Ю.В., Юшина К.И. и Гариповой С.Т. о Южно-Таннуолинском активном разломе и его соотношениях с новейшей структурой хребта Танну-Ола и северного борта впадины Убсу-Нур, Южная Сибирь

3. Сданная в журнал для публикации статья Соколова С.Ю. и Трифонова В.Г. о строении Хангайского мантийного плюма – нового типа мантийных плюмовых образований.

4. Сданная в журнал для публикации статья Тесакова А.С., Фролова П.Д., Якимовой А.А., Соколова С.А. и др., содержащая новые палеонтологические обоснования стратиграфии новейших отложений северного борта впадины Убсу-Нур.

5. Сданная в журнал для публикации статья Аржанниковой А.В, Аржанникова С.Г, Ritz J.-F., Чеботарева А.А., Яхненко А.С. по результатам исследований позднеплейстоцен-голоценовой кинематики и палеосейсмичности Мондинского разлома Тункинской системы впадин.

Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период

1.3.1. Новейшая структура региона

В 2022 г. В.Г. Трифонов проанализировал опубликованные материалы по тематике проекта и обобщил их вместе с новыми данными, полученными в 2022 г., включая результаты полевых работ и предпринятого анализа моделей рельефа, созданных на базе SRTM с 3" разрешением на местности, детальных космических изображений и геофизических данных. Исследования охватывали северную часть Центральной Азии – регион, ограниченный координатами 42°–58° с.ш., 88°–118° в.д.

Новейшая структура региона образована поднятиями, впадинами, нарушающими и разделяющими их разломами (рис. 1 в Приложении). Форма поднятий определялась как вершинная поверхность, огибающая выступы доверхнемелового основания. На основе предпринятого анализа и обобщения выделены две группы новейших поднятий. Первая группа представлена Хангайским и меньшим по размеру и высоте Хэнтэйским нагорьями. Это изометричные сводовые поднятия. Наиболее поднятая южная часть Хангайского нагорья достигает высоты 3500-4000 м. Вторую группу образуют линейные сводово-глыбовые поднятия (термин Н.А. Флоренсова [1965]) – Гобийский и Монгольский Алтай, Северная Тува, Восточный Саян. В их строении блоковые поднятия по разломам сочетаются с изгибными деформациями, степень которых уменьшается к северу. Большинство поднятий Прибайкалья и Забайкалья, сопряженных с грабенами, имеет форму односторонних горстов. Впадины представлены грабенами Байкала, Забайкалья и северной части Хангайского нагорья и депрессиями разных очертаний, группирующимися в пояса. С-образный пояс таких впадин (Центральная и Южная впадины Байкала, Тункинская, Тувинская и Убсунурская впадины, Котловина Больших Озер и Долина Озер) обрамляет Хангайское нагорье с севера, запада и юга. С ЮВ Хангайское и Хэнтэйское нагорья обрамлены кулисным рядом малоамплитудных прогибов северо-восточного простирания, протягивающихся вдоль границы Монголии.

Анализ разрезов впадин С-образного пояса, Байкала и Забайкалья, основанный на многочисленных публикациях [Логачев и др., 1964, 1974; Девяткин, 1981; Николаев и др., 1985; Девяткин и др., 1989; Hutchinson et al., 1992; Логачев, 2001, 2003; Мац и др., 2001; Рассказов и др., 2010; Мац, 2012, 2015; Shchetnikov et al., 2012; Krivonogov Safonova, 2017; Аржанникова, 2021; и др.; список использованной литературы приведен в Приложении], дополненных данными авторов проекта, позволил установить историю развития впадин и окружающих поднятий. Для ее описания мы распространили на весь регион разделение разреза на три тектоно-стратиграфических комплекса, предложенное для Байкала [Мац и др., 2001]. Они соответствуют трем этапам формирования новейшей структуры: верхний мел – ранний олигоцен, поздний олигоцен – ранний плиоцен, поздний плиоцен – квартер.

В течение первого этапа регион развивался в условиях вялых тектонических движений и планации. На территории между Тянь-Шанем и широтой южного края Хангайского нагорья формировался аккумулятивный пенеплен, характеризовавшийся накоплением маломощных тонкообломочных континентальных отложений платформенного типа. В близком режиме развивался Селенгино-Витимский прогиб. На остальной территории, включая Монгольский Алтай, Саяны и Хангайское нагорье возник денудационный пенеплен с останцами более древнего рельефа. На этом фоне погружались грабены Забайкалья и особенно интенсивно Южная и Центральная впадины Байкала, где накопилось до 3 км осадков. В течение второго этапа развития сформировался Собразный пояс впадин вокруг Хангайского нагорья. Мощность осадков в них возрастает с юга на север от 300 м в Долине Озер до 1400 м в Тункинской впадине и 2 км в Южной и Центральной впадинах Байкала. В Забайкалье возникают новые грабены. Характер осадков во впадинах свидетельствует о сносе грубого материала с соседних поднятий, т.е. их росте. Но он начался раньше. Снос материала с Хангайского нагорья отмечен с позднего мезозоя [Аржанникова, 2021], а в Гобийском и Монгольском Алтае выявлены реликты позднемезозойского денудационного пенеплена с корами выветривания, также свидетельствующие о существовании локальных пологих возвышенностей [Jolivet et al., 2007]. В течение третьего этапа продолжалось развитие ранее возникших структурных элементов. Возникла и интенсивно погружалась Северная впадина Байкала, и окончательно оформились черты Байкальской рифтовой зоны. Восточнее ее северного окончания, в Северном Забайкалье, сформировался кулисный ряд грабенообразных впадин, образовавших субширотную зону левосдвиговых деформаций. На фоне общего поднятия региона возросла контрастность рельефа. Сформировалась система активных разломов, в которой важная роль принадлежит сдвигам (см. рис. 1 в Приложении). Рисунок и кинематика активных разломов указывают на условия транспрессии на западе и в центре региона и транстенсии и растяжения в его северо-восточной части.

1.3.2. Хангайский плюм

О наличии плюма свидетельствовал меловой и кайнозойский внутриплитный базальтовый вулканизм мантийного происхождения [Ярмолюк и др., 1991, 1994, 1995, 2019; Windley, Allen, 1993; Рассказов 1993; Рассказов и др, 2000, 2005; Yarmolyuk et al., 2015]. В.В. Ярмолюк и его соавторы [1995] выделили в качестве плюмовых длительные и многократные проявления мантийного базальтового вулканизма в одних и тех же провинциях. На существование Хангайского плюма указывали предшествовавшие сейсмологические исследования [Зорин и др., 1988; Zorin et al., 1990; Huang, Zhao, 2006, 2022; Kulakov, 2008; Трифонов и др., 2021], но предлагавшиеся в них контуры и размеры плюма существенно разнились. Неопределенности характеристик плюма побудили С.Ю. Соколова провести дополнительные исследования на основе анализа объемной модели вариаций скоростей Р-волн, выраженных отклонениями скоростей Р-волн от средних для данных глубин значений (δVp) в процентах [Li et al., 2008]. Для выявления плюма и его особенностей на разных глубинах мантии была составлена серия разноглубинных сечений и ортогональных скоростных разрезов мантии, где наряду со значениями δVp непосредственно на разрезах было показано положение границы значения δVp = -0.22% между разрезами. Это позволило построить 3D модель плюма.

Установлено, что Хангайский плюм расположен под Центральной и Восточной Монголией и соседними территориями и представляет собой обширный объем мантии с существенно пониженными скоростями продольных (Р) волн. Главное тело плюма находится под Гобийским Алтаем и Хангайским нагорьем и протягивается на север до края Южной Сибири (Тува и южные склоны Восточного Саяна) (рис. 2 в Приложении). Плюм восходит с глубины ~1300 км, и его самая глубокая часть находится под южной частью Хангайского нагорья. На уровне переходного слоя мантии плюм разделятся на отдельные струи, а в подлитосферной верхней мантии расширяется и характеризуется особенно низкими значениями скоростей (до δ Vp ≤ 0.6%). Литосфера над плюмом утонена до 50 км. Восточнее основного тела плюма обособляется его Хэнтэйское ответвление, расположенное к ЮВ от Хэнтэйского нагорья и соединяющееся с основным телом плюма на глубинах 800–1000 км. Низкоскоростные потоки от Хангайского плюма и его Хэнтэйской ветви распространяются в Забайкалье. Вместе с тем, подтверждено существование канала с пониженными скоростями Р-волн, который, постепенно погружаясь, связывает мантию Забайкалья с низкоскоростными объемами мантии Тихоокеанской активной окраины [Жао и др., 2010]. Таким образом, низкоскоростная мантия Забайкалья может иметь смешанное происхождение.

На глубинах низов верхней мантии и верхов нижней мантии выявлена связь Хангайского плюма с Тибетским плюмом, расположенным под Центральным и Восточным Тибетом севернее Южно-Тибетского блока Лхаса. Тибетский плюм восходит с глубин 1400–1600 км и имеет форму воронки, расширяющейся в верхней мантии. Над плюмом литосфера утонена.

Неожиданное мантийное образование было обнаружено на пересечении ортогональных разрезов с координатами ~54° с.ш., 60° в.д. (под Южным Уралом). Здесь непосредственно над границей ядро-мантия был выделен объем с существенно пониженными скоростями Р-волн, сходный в этом отношении с Африканским и Тихоокеанским суперплюмами, но меньших размеров. По результатам предварительного анализа модели МІТР08, этот объем продолжается под Восточно-Европейскую платформу. То, что выделенный объем не является расчетным артефактом, подтверждают данные других исследователей, основанные на пяти разных сейсмотомографических моделях [Вопо et al., 2019]. Южнее выделенной скоростной аномалии, между 40° и 45° с.ш., обнаружено понижение скоростей Р-волн в верхней мантии. Оно в равном мере может быть связано как в указанной аномалией в основании мантии, так и с удаленной ветвью Африканского плюма,

выявленной южнее 35° с.ш. Углубленное изучение обнаруженного феномена выходит за рамки задач нашего проекта.

1.3.3. Экспедиционные работы в Монголии

Экспедиционные работы в Монголии проводились тремя группами исследователей под руководством, соответственно, А.В. Аржанниковой, А.Н. Овсюченко и С.А. Соколова.

1.3.3.1. Активная тектоника района Хубсугульской и Дархатской грабенообразных впадин

На севере Центральной Монголии расположены три субмеридиональные грабенообразные впадины – с запада на восток Бусийнгольская, Дархатская и Хубсугульская (рис. 3 в Приложении). С 1 по 17 августа 2022 г. на северо-западе побережья оз. Хубсугул А.Н. Овсюченко, Ю.В. Бутанаев и Н.Г. Кошевой выполнили детальные исследования очаговой зоны Хубсугульского землетрясения, произошедшего 12 января 2021 года. Позже была выполнена обработка результатов полевых исследований и анализ опубликованных, дистанционных и других картографических материалов. Землетрясение имеет параметры – Мw=6.7, ML=6.9, глубина очага ~8 км, [Еманов и др., 2022]. Решения фокального механизма свидетельствуют о сбросе со сдвиговой компонентой [Еманов и др., 2022; Battogtokh et al., 2021; He et al., 2022; Liu et al., 2022]. Эпицентр землетрясения расположен в западном борту Хубсугульской впадины. Эта новейшая структура развивается в условиях растяжения с правосдвиговой компонентой вдоль разломов СЗ простирания и левосдвиговой при CB ориентировке [Кочетков и др., 1993; Аржанникова и др., 2003].

В результате первичного геологического обследования эпицентральной области через три дня после землетрясения были выявлены только вторичные нарушения [Battogtokh et al., 2021]. Проведенные нами полевые исследования включили два основных направления – детальное картирование остаточных нарушений и изучение следов древних землетрясений. По первому направлению выполнялось полевое картирование нарушений и определение их параметров. Палеосейсмологические исследования сопровождались структурно-геоморфологическим картированием тектонических деформаций молодых форм рельефа (рис. 4 в Приложении). В целях изучения истории сейсмотектонических подвижек в позднем голоцене были пройдены траншеи, где отобрано 6 образцов на радиоуглеродное датирование (рис. 5 в Приложении).

Выявленные нами следы землетрясения четко делятся на две группы: вторичные, представляющие собой результат сейсмических сотрясений, и первичные, отражающие выход очага землетрясения на поверхность в виде сейсмотектонического разрыва. Сейсмотектонический разрыв представлен правосторонним сбросо-сдвигом с амплитудой смещения до 20 см в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Его тектоническая природа подчеркивается образованием закономерного структурного парагенеза, разрывами всех форм рельефа. Разрыв имеет ССЗ (340-350о) простирание и прослежен на ~250 м. В траншее, пройденной вкрест простирания разломного уступа выявлен сброс с падением под углом 25-300 В со смещением современной поверхности и почвы на 15–20 см. В основании уступа вскрыты разрывы 3-х предыдущих землетрясений, которые последовательно вовлекали в опускание все новые участки со стороны хребта. Таким образом, можно говорить об экспансии впадины в западном направлении с последовательным захватом и деструкцией прилегающего горного поднятия. Вторичные нарушения представлены мелкими обвалами, осыпями, камнепадами, сейсмогравитационными и сейсмовибрационными трещинами и выбросами обводненного песка. Параметры вторичных нарушений были использованы для определения интенсивности сотрясений по шкале ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity) [Michetti et al., 2007] и оконтуривания эпицентральной зоны. По средним размерам сейсмовибрационных трещин (длина 25-40 м при ширине до 30 см), величине отброшенных со склонов глыб (до 2.5×3 м на 25-30 м), объему обвалов (20-30 тыс. м3) получена интенсивность 8 баллов, которой соответствуют и параметры сейсморазрыва. Полученная эпицентральная интенсивность показывает, что оценка глубины очага 8 км представляется заниженной.

Очаг землетрясения расположен в крутом западном борту Хубсугульского полуграбена. К юго-западу от сейсморазрыва расположена область максимальной концентрации афтершоков [Еманов и др., 2022], и максимальных деформаций по данным спутниковой радарной интерферометрии [Liu et al., 2022]. Модель разрыва по данным интерферометрии представлена плоскостью с СЗ простиранием (3410) и углом падения 45–540 в восточном направлении, т.е. в сторону гипоцентра, достигая глубины 18–24 км [Тимошкина и др., 2022; Battogtokh et al., 2021; He et al., 2022; Liu et al., 2022]. Максимальная величина смещения (1.2 м) предполагается на глубине 7 км, а на поверхности зафиксировано опускание до 20 см [Battogtokh et al., 2021; Liu et al., 2022]. Эти данные хорошо согласуются с результатами полевых исследований, что позволяет рассматривать выделенную область максимальных сотрясений в качестве проекции очага на поверхность.

Наиболее активна в сейсмическом плане Бусийнгольская впадина, в ее пределах зарегистрировано максимальное количество крупных современных землетрясений, по сравнению с соседними впадинами [Radziminovich et al., 2016]. Землетрясения, произошедшие в Хубсугульской впадине в 2021 г., свидетельствуют о гетерогенном поле напряжений в этой впадине [Battogtokh et al., 2021; Liu et al., 2022]. В Дархадской впадине за инструментальный период были зафиксированы лишь слабые землетрясения с магнитудой меньше 5.5.

В пределах Дархадской впадины предыдущими исследованиями были выделены две палеосейсмодислокации и проведена предварительная оценка их параметров [Кочетков и др., 1993]. Более детальные исследования не проводились. В июле-августе 2022 г. А.В. Аржанникова, С.Г. Аржанников, А.А. Чеботарев и сотрудник Института астрономии и геофизики АН Монголии Э. Номин-Эрдэнэ провели полный комплекс морфотектонических и палеосейсмологических исследований в зонах главных активных разломов Дархадской впадины. Работы проводились на двух известных сейсмодислокациях: Джара-Гол (в северной части впадины в восточном борту) и Том-Гол (в южной части впадины), а также в ходе работ выявлены и закартированы две новые сейсмогенные структуры - Хогор-Гол и Хулган. Хогор-Гол – меридиональный разлом в западном борту северной части впадины, а Хулган – один из взбросо-надвиговых разломов, контролирующих с юга поднятие хребта Хорьдолын-Сардык, расположенного между Дархадской и Хубсугульской впадинами. В работах на последнем участке приняли участие сотрудники группы А.Н. Овсюченко. Особый интерес вызвала взбросо-надвиговая структура Хулган. Позднеголоценовые смещения, представленные здесь уступами, валами и рвами на поверхностях высокой пойменной и 1-ой надпойменной террас, тектоническими дамбами, горизонтальными смещениями бровок речных террас и долин и т.п., были закартированы на 15 участках. На трех они были заверены в канаве и расчистках. В долине р. Бэлтэсийн-Гол в двух расчистках были изучены надвиги, деформирующие поверхность и отложения 1-ой надпойменной террасы. Надвиги имеют общее субширотное простирание, образуя крупную дугу, огибающую подножие высокогорного массива.

Морфотектонические исследования заключались в построении цифровых моделей рельефа зон деформаций (рис. 6, 7 в Приложении), определении кинематики разломов и амплитуд смещения. Палеосейсмогеологические исследования проводились методом тренчинга в крест простирания сейсмогенных деформаций. Всего по разломам Дархадской впадины нами было выкопано и задокументировано 6 траншей, где были выявлены следы, как минимум, двух палеоземлетрясений для каждого из разломов. Отобраны образцы на 14С (37 образцов) для датирования палеоземлетрясений, а также 2 образца на OSL из аллювия деформированных в зоне разломов Джара-Гол и Хулган террас, датирование которых позволит рассчитать скорости смещения по разломам.

1.3.3.2. Цэцэрлэгский активный разлом

С 18 по 20 августа 2022 г. группа А.Н. Овсюченко совместно с С.А. Соколовым, А.Р. Сизовым, К.И. Юшиным, А.А. Якимовой и сотрудником Института астрономии и геофизики АН Монголии Ц. Батсайханом выполнили исследования Цэцэрлэгского активного разлома в левом борту р. Тэсийн-Гол (Тэс-Хем). Здесь была выполнена аэрофотосъемка участка сейсмотектонического разрыва, вскрывшегося при землетрясении 9.07.1905 г. с М~8.0 (рис. 8 в Приложении). Разрыв был изучен в двух траншеях на поверхности высокой (1-2 м) пойменной террасы р. Тэсийн-Гол,

сложенной пойменными песками. Одна была пройдена через свежий ров 1905 г. Вторая вскрыла разрез более древнего и заплывшего рва. Ров ограничен двумя встречными сбросами, между которыми, в основании современного степного бурозема из погребенной песком линзы почвенного гумуса отобран образец на радиоуглеродное датирование. Еще два образца были отобраны в 500 м к северу от сейсморазрыва, в разрезе пойменных песков высокой пойменной террасы р. Тэсийн-Гол из гумусовых горизонтов пойменных торфянистых палеопочв. Они маркируют накопление горизонта, разделяющего две пачки песков, в разной степени деформированных асимметричными диапироподобными складками. Их особенности могут свидетельствовать об импульсном сейсмическом воздействии в результате предпоследнего землетрясения. Несмотря на постоянные исследования системы сейсмотектонических разрывов, образовавшихся в результате сейсмической активизации 1905 г., исследования предыдущих сейсмических событий по Цэцэрлэгскому сейсморазрыву авторам отчета не известны.

1.3.3.3. Проблемы неотектоники Котловины Больших Озер и Хангайского нагорья

С.А. Соколов, К.И. Юшин, А.В. Сизов и А.А. Якимова совместно с сотрудником Института астрономии и геофизики АН Монголии Ц. Батсайханом осуществили стратиграфические, палеонтологические, неотектонические, палеосейсмологические и вулканологические экспедиционные исследования в августе 2022 г. на территории севера и северо-запада Монголии. Работы проводились в котловине Больших Озер, на северном побережье оз. Хиргис-Нур, в северных районах Хангайского нагорья, долине реки Тес (Тес-Хем), возле оз. Тэрхийн-Цаган-Нур.

Было исследовано обнажение неогеновых пород и местонахождение фауны мелких и крупных млекопитающих к северу от оз. Хиргис-Нур (рис. 9 в Приложении), впервые описанное в 1970-1980ых годах [Девяткин, 1981, Певзнер, 1982]. Разрез представлен континентальными неогенчетвертичными отложениями (рис. 10 в Приложении). Нижняя часть толщи – пестроцветные озерные глины с прослоями песков и алевритов. Средняя часть неогеновых отложений – аллювиальные отложения горизонтально и косо слоистых песков и алевритов. В этой части разреза нами было найдено большое количество остатков ископаемой фауны крупных и мелких млекопитающих, птиц, моллюсков, костей рыб и их отпечатков. Завершает неогеновый разрез пачка пресноводных мергелей и известковистых глин. Концентрация костного материала тут значительно падает. Данный разрез формирует свиту хиргис-нур. Согласно устоявшимся взглядам [Девяткин, 1981, Девяткин и др., 1989] возраст этих отложений определен как поздний миоцен – ранний плиоцен. На основе ревизии материалов, собранных в ходе работы Советско-Монгольской экспедиции, и нового материала, полученного в ходе наших работ, верхняя граница свиты хиргис-нур уточнена: осадконакопления свиты завершилось в верхнем миоцене. Это разрез является ключевым в стратиграфии неогена значительного региона Евразии. В частности, отложения того же возраста выделяются на севере Убсунурской впадины в хольскую серию аналогичного строения [Зайцев, 1947, Шорыгина, 1960, Попова, 1968, Государственная..., 2008], где нами найден схожий комплекс ископаемой фауны. Отсутствие грубого материала в осадках, примыкающих к горному обрамлению впадины Хиргис-Нур, может говорить об отсутствии дифференциации Котловины Больших Озер и Убсунурской впадины на границе миоцена и плиоцена. На неогеновых породах с размывом залегает грубообломочная толща верхнего плиоцена-плейстоцена. В ней выделены несколько ритмов, начинающихся с грубообломочного пролювиального материала и завершающегося тонкообломочными породами. В этих отложениях, прежде считавшихся немыми, нами впервые были обнаружены кости птиц.

Вблизи горного обрамления котловины оз. Хиргис-Нур неогеновые и четвертичные отложения вздернуты до значительных углов падения и разбиты локальными крутыми разрывами в результате надвигания юрских конгломератов на новейшие отложения (см. рис. 10 в Приложении). Плоскость надвига относительно полого падает на ССВ, перекрывая как верхнюю карбонатную пачку неогеновых отложений, так и четвертичные пролювиальные накопления. Юрские конгломераты, четвертичные породы и плоскость надвига запечатаны пачкой грубообломочного недеформированного коллювиального материала, что говорит об отсутствии подвижек по разлому, как минимум, в голоцене, а, возможно, и в позднем плейстоцене. Накопление плиоцен-четвертичной грубообломочной толщи обусловлено формированием хребта Хан-Хухейн, вдоль которого протягивается на 370 км Хангайский (Балнайский) левый сдвиг, с которым связано сильнейшее землетрясениев 26 августа 1905 г. [Хилько и др., 1985].

Установлено, что от места сочленения Цэцэрлегского и Хайнгайского активных разломов, на север протягивается субмеридиональная Дунганская зигзагообразная система свежих рвов растяжения и волов сжатия, характерная для правого сдвига (рис. 11 в Приложении). Зона разлома следится более, чем на 30 км и далее затухает. В южной части разлома была заложена канава, в стенке которой выявлена трещина, уходящая на глубину и секущая комплекс новейших отложений. Трещина заполнена рыхлым материалом и соответствует последней подвижке по разлому (возможно, событию 1905 г.). Из канавы были взяты пробы грунта для датирования этого события.

В окрестностях озера Тэрхийн-Цагаан-Нур обследован вулканический конус неогенчетвертичного возраста и окружающее его вулканическое плато, сложенное потоками базальтов и пирокластическим материалом (рис. 12 в Приложении). Базальты содержат крупные мантийные ксенолиты оливина и оливиновые вкрапленники. Из двух потоков базальтов, представленных как плотными породами, так и вспененными разностями пирокластического основания вулканического конуса, собран материал для изучения петрографических, минералогических, геохимических особенностей вулканических пород, датирования извержений, выявления параметров вулканической камеры и геодинамической характеристики вулканизма.

1.3.4. Экспедиционные работы в Тыве и Тункинской системе впадин на юге Сибири

Группа А.Н. Овсюченко выполнила полевые структурно-геоморфологические, палеосейсмологические и сейсмогеологические исследования активных разломов Центрально-Тувинской системы межгорных впадин (Кызыльской, Улугхемской, Хемчикской) в Республике Тыва. Работы были направлены на структурно-геоморфологический анализ различных позднекайнозойских геоморфологических уровней с выявлением их голоценовых тектонических деформаций. Работы сопровождались аэрофотосьемкой с беспилотного летательного аппарата и тренчингом. С 15 июля по 23 июля работы проводились в Кызыльской и Улугхемской впадинах. Были изучены и закартированы с БПЛА сейсмотектонические смещения в зоне Кызыльского разлома, трассируемого вдоль правого борта долины р. Енисей западнее г. Кызыл. Разлом в качестве неотектонического был известен ранее [Прудников, 2004]. Нами зафиксированы одноактные левосдвиговые смещения на 50–70 см исторического возраста и 4–5 м позднеголоценового возраста. Вскрытый в расчистке основной разрыв имеет взбросо-надвиговую кинематику с равноценной по вкладу левосдвиговой компонентой при общем СВ простирании.

С 21 по 25 августа 2022 г. выполнены исследования активных разломов на западе Хемчикской впадины в районе уйгурской крепости Малгаш-Бажын (рис. 13 в Приложении). Крепость Малгаш-Бажын (Глиняный дом) была открыта в 1977 г. Л.Р. Кызласовым [1979] на левом берегу р. Хемчик в 5 км к северо-западу от г. Ак-Довурак. В 179 м южнее крепости выявлен субширотный левый сдвиг по смещению тылового шва надпойменной террасы притока р. Эдегей на 75–80 м при высоте разломного уступа 30–35 м. Длина разлома – 10.5 км. Стены крепости нарушены вертикальными трещинами со смещениями до 20 см и искривлены, подобно присдвиговому искривлению стен монастыря в Сирии [Кагакhanyan et al., 2008]. Судя по стратиграфии завалов, стены испытали двукратные катастрофические разрушения. В завалах содержатся аномально перемещенные и сразу захороненные фрагменты кладки. По всей видимости, первое землетрясение произошло во время функционирования крепости, или сразу после, т.к. завал у внутреннего (южного) фаса стены налегает на культурный слой, который не содержит почвенного гумуса. Гибель крепости и землетрясение предположительно датируется 835–840 г. [Кызласов, 1979; Тулуш, 2015].

Обработаны материалы полевых работ предыдущих лет по неотектонике и активным разломам хребта Танну-Ола и бортов Тувинской впадины. Хребет Танну-Ола образует ландшафтную границу между Южной Сибирью и Центральной Азией. Вдоль него протягивается водораздел между бассейном Северного Ледовитого океана и бессточными котловинами Монголии. В сравнении с соседними хребтами Алтае-Саянского нагорья – Западным Саяном и Цаган-Шибету, Танну-Ола

имеет значительно меньшие абсолютные отметки и относительно слабое расчленение. Контрастный горный рельеф развит в основном на склонах хребта, тогда как в осевой части наблюдаются обширные поверхности выравнивания и отдельные внутригорные впадины. С юга хребет окаймляется наклонной предгорной равниной, созданной аккумуляцией пролювиальноаллювиального шлейфа в неоплейстоцене-голоцене. Южный склон хребта имеет ступенчатое строение и образован поднятыми на разную высоту фрагментами предгорной равнины.

Хребет сложен интенсивно дислоцированными вулканогенно-осадочными формациями нижнего-среднего кембрия, которые прорваны крупными гранитоидными интрузиями нижнесреднепалеозойского возраста. Формирование хребта Танну-Ола в современном виде привело к объединению в единый структурно-орографический элемент разнородных палеозойских тектонических образований. Они имеют различную ориентировку основных разрывно-складчатых структур и претерпели движения с разным знаком. В классической трактовке тектонического устройства Тувы, Танну-Ола представляет собой область кембрийской (салаирской) складчатости на которую наложены каледонские и герцинские структуры среднего–позднего палеозоя [Геология, 1966].

К югу от хр. Танну-Ола расположена бессточная Убсунурская впадина, выполненная кайнозойскими континентальными осадками молассовой формации. Она также заложена на разновозрастных и разнородных тектонических структурах. Наиболее прогнутая часть впадины, где мощность рыхлого чехла по геофизическим данным может достигать 900 м, прижата к её северному тектоническому борту и вытянута вдоль широтного отрезка р. Тес-Хем [Раковец, 1978]. История осадконакопления в Убсунурской впадине свидетельствует о начале формирования хребта в палеогене, когда началось накопление красноцветного обломочного горизонта. Новое эрозионное расчленение района произошло в конце плиоцена – начале четвертичного периода. Наличие позднеплиоцен-эоплейстоценовых «бурых галечников» на высоко поднятом водоразделе свидетельствует о значительном росте хребта Танну-Ола в четвертичное время. Вероятно, к этому же времени приурочены перехваты рек и перераспределение речной сети в пределах хребта, описанные И.И. Белостоцким [1958]. Так, р. Куже перехватила своим верховьем р. Кульгу-Адыр, ранее левого притока р. Манчурек, а верховья р. Холу принадлежали прежде к системе р. Улуг-Сайлыг. В это же время на южном склоне растущего Танну-Ола были дислоцированы плиоценовые озерно-аллювиальные осадки древнего Убсу-Нура (см. рис. 1 в Приложении).

Дислокации в неогеновых отложениях северного борта Убсунурской депрессии, где на них надвинуты породы палеозоя, были описаны Н.С. Зайцевым [1947]. Они протягиваются полосой на некотором удалении от подножия хребта, иногда подступая вплотную к выходам палеозоя. С этой полосой связано резкое погружение палеозойского цоколя Убсунурской впадины. Степень дислоцированности убывает вверх по разрезу, от палеогеновых отложений, где углы падения достигают 70°, к четвертичным с углами падения до 20°. На кайнозойские осадки Убсунурской депрессии взброшены или надвинуты кембрийские вулканогенно-осадочные толщи, обнаженные на южном склоне Танну-Ола. Породы неоднократно претерпели интенсивные тектонические деформации в течение нескольких полномасштабных циклов тектогенеза и прорваны разновозрастными палеозойскими интрузиями.

Четвертичные тектонические деформации ранее были изучены у южного подножия Западного Танну-Ола в районе п. Торгалыг [Чернов, Зеленков, 1978; Вдовин, Зеленков, 1982]. Расположенная здесь передовая линейная гряда Мугун-Цэхир-Ула испытала резкое новейшее поднятие, о чем свидетельствует глубокое врезание русла р. Кадвой (Кадый) на сравнительно небольшом участке поднятия, тектоническое подпруживание ряда второстепенных притоков, поворот течения в обратную сторону и цепь форбергов с тектоническим бедлендом на северном склоне гряды. Гряда Мугун-Цэхир-Ула выступает среди пролювиальных осадков, отделяя Торгалыгскую впадину от Убсу-Нурской котловины. В результате роста гряды в позднечетвертичное время, долины рек, стекавших в оз. Убсу-Нур, во многих местах были подпружены. В них возникли внутренние дельты и конусы выноса. Только наиболее полноводные реки Кадвой, Торгалыг и Ирбитей смогли преодолеть интенсивно поднимающийся хребет, образовав в нем ущелья. Интенсивное поднятие привело к выводу на дневную поверхность неогеновых и раннечетвертичных отложений, наблюдаемых в долине р. Холу. В этом же районе, у подножия южного склона Западного Танну-Ола были выявлены предположительно сейсмогенные разрывы, рассекающие конусы выноса рек Ораш и Чалама [Чернов, Зеленков, 1978]. Наблюдаемые в рассматриваемом районе структуры характерны для всего региона. Формирование структур сжатия (взбросо-надвигов и форбергов) на границе гор и впадин является яркой отличительной структурно-тектонической чертой современного орогенеза в Монголии и Алтае-Саянском нагорье. Эта черта, подробно описанная Н.А. Флоренсовым [1965] как гобийский «сценарий» горообразования, заключается в экспансии гор в сторону впадин за счет надвигания на предгорные прогибы, смятия их окраин и втягивания в поднятие.

Полевые исследования проведены между Самагалтаем и р. Холу (рис. 14 в Приложении). Здесь, вдоль подножия хребта прослежена извилистая система уступов. Плановая конфигурация системы уступов позволяет рассматривать их как результат молодых смещений надвигового типа. Длина прослеженного уступа в подножии южного склона Танну-Ола – около ~90 км. В долине р. Улут-Оруг в канаве вскрыт уступ высотой 5 м, секущий первую надпойменную террасу. В основании разреза пролювиальных отложений залегает толща пылеватых светло-серых песков с редкими валунами и щебнем. Она венчается пористым (многочисленные канальцы), пылеватым песком с песчаной палеопочвой (лёсс). Современная почва буро-степная без гумусового горизонта. На верхней площадке современная почва развита на грубоокатанном, крупнообломочном пролювии с линзами дресвы (гравия). На нижней – на пылеватых песках (лёссе). Пролювий в виде серии из четырех чешуй надвинут на лёссовые горизонты с палеопочвами. Разновозрастные чешуи надвинуты на разновозрастные почвенные горизонты. В результате вблизи сместителя в приповерхностных горизонтах линзовидных песков наблюдается расщепление. Состав почв вверх по разрезу приближается к современной.

Самая верхняя чешуя надвинута на легкий, пористый, песчаный почвенный горизонт. Величина горизонтального перекрытия почвенного горизонта 1,5–1,7 м. Нижние горизонты палеопочв перекрыты примерно с такой же амплитудой более древними надвиговыми чешуями. Последняя подвижка привела к перекосу кургана, который оказался слегка перекрыт наносами с уступа. На уступ попал лишь один курган из цепочки аналогичных курганов, вытянутой поперёк уступа. Это свидетельствует о том, что подвижка произошла в исторической время.

Группа А.В. Аржанниковой выполнила работы в Тункинской системе впадин, которая состоит из более мелких депрессий и межвпадинных перемычек, обрамлена с юга и севера хребтами Хамар-Дабан и Тункинские гольцы, соответственно, и контролируется с севера Главным Саянским, Тункинским и Мондинским разломами (рис. 15 в Приложении). Были закончены работы по изучению Мондинского разлома (написана и отправлена в печать статья), а также начаты работы по изучению неоген-четвертичной истории развития впадины, в частности, эволюции источников сноса. Выявлены питающие провинции Тункинской впадины на современном этапе. Тункинские гольцы вносят небольшой вклад, а в основном материал поступает с Хамар-Дабана. Для того, чтобы оценить, как развивалась впадина на предыдущих этапах, которые включают этап «медленного рифтига» олигоцен–раннеплиоценовый и этап «быстрого рифтинга» позднеплиоцен–четвертичный, были отобраны образцы на датирование детритовых цирконов из пяти неогеновых обнажений. Также были отобраны образцы из долины р. Китой (водосбор которой охватывает всю площадь Тункинских Гольцов) и р. Зун-Мурино (водосбор охватывает половину площади хр. Хамар-Дабан) для характеристики возрастов питающих провинций. Также был взят образец из современного аллювия р. Иркут (протекающей вдоль всей Тункинской долины и имеющей в своем аллювии вклад с обоих бортов впадины) для сравнения с миоценовыми и позднеплиоценовыми источниками сноса и их вкладом в осадконакопление впадины. На данном этапе образцы проходят пробоподготовку на базе Центра коллективного пользования "Геодинамика и геохронология" Института земной коры СО PAH.

Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде

1.4.1. Статья «Локализация очага сильного исторического землетрясения в Центральной Туве с использованием фольклорно-исторических и палеосейсмологических данных». Авторы: Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Кошевой Н.Г. Статья представлена для опубликования в журнал «Геотектоника».

В статье изложены результаты исследований очага сильного землетрясения вблизи Кызыльской агломерации. Исследования проводились с использованием как геологогеоморфологического подхода, так и методов исторической и археосейсмологии. Проведенные исследования показали, что в Туве использование фольклора совместно с письменными источниками существенно расширяет рамки историко-сейсмологического анализа. Ценность фольклорных произведений связана с тем, что имеющиеся письменные исторические источники Тувы ограничены второй половиной XIX в. [Самдан, 2016], а для удалённых районов (Минусинска, Кузнецка, Барнаула, Рудного Алтая) сведения о землетрясениях имеются, начиная с середины XVIII в. [Мушкетов, Орлов, 1893], тогда как большинство очагов этих событий были расположены в горных хребтах Алтае-Саянского нагорья.

В качестве отправной точки нами использована былина «Улу-Дуне» («Великая ночь»). В былине рассказывается, как Кара-Хам (Черный шаман), объединившись с Духом Земли, прогоняет китайских захватчиков с тувинской земли. При этом произошло катастрофическое обрушение береговых утесов р. Енисей и поглощение рекой половины китайского лагеря. Описанные явления имеют признаки сильного землетрясения, а событие приблизительно датировано письменными источниками 1715–1758 гг. Имеется конкретный топоним – гора Джарга, с которой с грохотом падали камни. Для проверки фольклорных сведений были выполнены палеосейсмологические исследования. В подножии горы Джарга были обнаружены, изучены и закартированы с БПЛА сейсмотектонические смещения в зоне Кызыльского разлома, трассируемого вдоль правого борта долины р. Енисей западнее г. Кызыл. Разлом в качестве неотектонического был известен ранее [Прудников, 2004]. Нами были зафиксированы одноактные левосдвиговые смещения на 50-70 см исторического возраста и 4-5 м позднеголоценового возраста. Строение уступа изучено в расчистке, пройденной в западном борту портала угольной шахты в угленосных юрских песчаниках. Вскрытый в расчистке разрыв смещает все слои разреза. Разлом имеет взбросо-надвиговую кинематику с равноценной по вкладу левосдвиговой компонентой при общем СВ простирании. Длина прослеженного уступа последней генерации – около 27 км, что в совокупности с оценками величин импульсных смещений дает надежный материал для определения магнитуды исторического землетрясения. Результаты исследований позволяют определить северную границу Кызыльской межгорной впадины как разломную с взбросо-надвигово-левосдвиговой кинематикой смещений в голоцене.

1.4.2. Статья «Новейшая структура северного обрамления Убсунурской впадины (Тыва, Россия) и ее соотношение с активными разломами». Авторы: Соколов С.А., Гарипова С.Т., Бутанаев Ю.В., Зеленин Е.А., Юшин К.И., Овсюченко А.Н., Мазнев С.В. Статья представлена для опубликования в журнал «Геотектоника».

Путем дешифрирования данных дистанционного зондирования намечены плоскости неотектонических разрывных нарушений, оценена их кинематика и основные характеристики. Полевые работы выполнялись для заверки данных дешифрирования и получения точных данных о кинематике и возрасте разломов и подвижек по ним. Работы проводились на севере Убсунурской впадины и в предгорьях Центрального и Восточного Танну-Ола и хребта Сангелен в 2020 и 2021 годах. Исследованы также зоны Южно-Таннуольского и Эрзин-Агардагского активных разломов, где выявлены смещения современных форм рельефа, русел водотоков, поверхностей речных террас, линий водоразделов и водораздельных поверхностей, тектонических уступов, нарушающих предгорные пролювиальные равнины. В крест простирания разломов выкопаны канавы, в их стенках изучен комплекс новейших отложений и их деформации, определены амплитуды и кинематика подвижек. Представлены полученные авторами новые данные об олигоцен-четвертичных отложениях и новейшей (неоген-четвертичной) структуре северного борта Убсунурской впадины на ее границе с поднятием хребта Танну-Ола и о соотношении пограничных деформаций с активными в позднем плейстоцене и голоцене разломами. В пограничной области выявлены два парагенезиса разрывных нарушений, активных на неотектоническом этапе развития. Первый парагенезис образован Северо-Убсунурским скрытым надвигом, выраженным флексурой в осадочном чехле, и принадвиговыми деформациями. Он играет важную структурообразующую роль, разделяя Убсунуоскую впадину и поднятие Танну-Ола и обеспечивая многосотметровые амплитуды вертикальных тектонических движений. Его заложение датируется границей олигоцена и миоцена, а развитие занимало весь неоген и плейстоцен. В позднем плейстоцене и голоцене структуры первого парагенезиса проявляют слабые признаки активности. Южно-Таннуольский и Эрзин-Агардагский левые взбросо-сдвиги второго парагенезиса протягиваются косо к границам впадины, секут их. Оба разлома проявляют все признаки активизации в позднем плейстоцене и голоцене, как геоморфологические, так и сейсмогеологические. Таким образом, наиболее интенсивное развитие второго парагенезиса происходило после наиболее интенсивного развития первого парагенезиса, хотя в четвертичное время парагенезы развивались одновременно.

1.4.3. Статья "Khangay intramantle plume in Mongolia: 3D model, influence on Cenozoic tectonics of the lithosphere, and comparison with other mantle plumes" («Хангайский внутримантийный плюм в Монголии: 3D модель, воздействие на кайнозойскую тектонику литосферы и сравнение с другими мантийными плюмами»). Авторы: Vladimir G. Trifonov, Sergey Yu. Sokolov, Sergey A. Sokolov, Stepan V. Maznev, Kirill I. Yushin, Sodnomsambuu Demberel. Статья сдана для опубликования в Journal of Asian Earth Sciences и сейчас находится на стадии рецензирования.

Главная цель статьи – показать соотношения Хангайского плюма и новейшей структуры региона. Изложены сведения о форме и строении Хангайского плюма и его ответвлений, расположенного южнее Тибетского плюма, кайнозойской структуре земной коры над Хангайским плюмом и его обрамлениями и истории ее формирования. Эти сведения приведены в разделе 1.3.1 отчета. Анализ морфологии и кинематики элементов кайнозойской структуры приводит к заключению о существовании на севере Центральной Азии двух кайнозойских структурных парагенезов. Один из них (назовем его Хангайским) образован сводовыми поднятиями Хангайского и Хэнтэйского нагорий и обрамляющими их поясами межгорных впадин – С-образным поясом вокруг Хангайского нагорья и кулисным рядом впадин северо-восточного простирания к юго-востоку от Хангайского и Хэнтэйского нагорий.

Второй парагенез лучше всего выражен ансамблем активных разломов. Его общей чертой является доминирование сдвигов и зон сдвиговых деформаций при ориентировке осей относительного сжатия на CB–ЮЗ и относительного растяжения на C3–ЮВ. При этом на западе и в центре региона (западнее ~104° в.д.) сдвиги чаще всего имеют взбросовую составляющую смещений или сочетаются со взбросами, обозначая транспрессивные условия разломообразования, а на CB региона (восточнее ~104° в.д.) преобладают сбросы, местами группирующиеся в зоны левосдвиговых деформаций или сопровождаемые левыми сдвигами, обозначая условия растяжения или транстенсии.

Первый парагенез связан с воздействием вертикальных сил, обусловивших поднятие нагорий и появление радиальных сил, приведших к растяжению и опусканию впадин. Второй парагенез является следствием латерального взаимодействия плит и блоков литосферы. Рассматриваются два объяснения сочетания столь различных динамических воздействий: парагенезы разновозрастны или являются результатом процессов, происходящих на разных уровнях тектоносферы. Хангайский парагенез формировался длительно. Впадины С-образного пояса развивались с позднего олигоцена до конца квартера, а Хангайский свод проявлялся как источник сноса обломочного материала с конца мезозоя. Большинство активных разломов развиваются с позднего плиоцена поныне. Однако грабены Забайкалья, сходные с аналогичными грабенами парагенеза активных разломов, формировались, начиная с мела. Южная и Центральная впадины активной Байкальской рифтовой зоны возникли в позднем мелу. Активные разломы участвуют в строении линейных сводовоглыбовых поднятий Восточного Саяна, Монгольского и Гобийского Алтая, рост которых фиксируется, по меньшей мере, с позднего олигоцена сносом с них обломочного материала. Следовательно, парагенезы развивались одновременно, и их различие обусловлено особенностями процессов на разных уровнях тектоносферы.

Сопоставление Хангайского парагенеза с контурами Хангайского плюма на разных его глубинах показывает, что Хангайское нагорье находится над главным телом плюма, а самая высокая часть нагорья совпадает с корнем плюма на глубине ~1300 км. Хэнтэйское нагорье находится непосредственно с СЗ от Хэнтэйского ответвление плюма и частично над ним. Пояса впадин обрамляют главное тело плюма и его Хэнтэйское ответвление. Мы предполагаем, что образование нагорий связано с вертикальным давлением плюма, а пояса впадин – с радиальными силами, возникающими при таком давлении. Все проявления базальтового внутриплитного вулканизма, который может считаться плюмовым [Ярмолюк и др., 1995] находятся внутри контуров Хангайского плюма на тех или иных глубинах.

Второй структурный парагенез возник в результате взаимодействия плит и блоков литосферы. На северо-востоке региона это более высокая скорость юго-восточного дрейфа Амурской плиты по сравнению с соседней частью Евразии, приводящая к отодвиганию Амурской плиты от Сибирской платформы. На западе и в центре региона это коллизия Индийской и Евразийской плит, а конкретно – литосферных блоков Центральной Азии и Сибирской платформы. Из-за утонения и разупрочнения литосферы над Тибетским и Хангайским плюмами структурообразующий эффект давления Индийской плиты к северу ослабевает и более важную роль приобретает встречное давление Сибирской платформы.

Над Хангайским и Тибетским плюмами литосфера утонена, и с обоими плюмами связаны поднятие земной поверхности и существенные, хотя и ограниченные по площади деформации земно коры смежных территорий. Мы полагаем, что эти плюмы представляют особый класс мантийных плюмовых образований, восходящих из верхней части нижней мантии. Этим они отличаются как от верхнемантийных плюмов, так и от Африканского и Тихоокеанского суперплюмов, восходящих от границы мантии и ядра Земли. На разных глубинах верхней мантии и верхов нижней мантии выявлены объемы с пониженными в разной мере скоростями Р-волн, которые могут рассматриваться как каналы связи Хангайского и Тибетского плюмов с удаленными ветвями Африканского и Тихоокеанского суперплюмов. Это дает основание предположить, что суперплюмы могли питать Хангайский и Тибетский плюмы. Допускается, однако, и их самостоятельное образование.

1.4.4. Статья Тесакова А.С., Фролова П.Д., Якимовой А.А., Соколова С.А. и др., содержащая новые палеонтологические обоснования стратиграфии новейших отложений северного борта впадины Убсу-Нур, подготовлена. Но авторы отказались от ее опубликования в виде отдельной статьи, поскольку в ходе полевых работ 2022 г. был описан разрез Хиргис-Нур на северном борту Котловины Больших Озер (см. раздел 1.3.3.3), откуда была собрана обширная и уникальная по своему содержанию коллекция остатков крупных и мелких млекопитающих. Отложения этого разреза коррелируются с отложениями, изученными на севере Убсунурской впадины, и значение содержащихся там палеонтологических остатков существенно возрастает при сопоставлении с палеонтологическим материалом из разреза Хиргис-Нур. Обработка этого материала сейчас заканчивается. Статья с результатами его изучения и сопоставления с палеонтологическим материалом из разрезов северного борта Убсунурской впадины будет сдана для опубликования в журнал «Стратиграфия. Геологическая корреляция» в начале 2023 г.

Еще одна стратиграфо-палеонтологическая статья «An early Miocene skeleton of Brachydiceratherium Lavocat, 1951 (Mammalia, Perissodactyla) from the Baikal area, Russia, and a revised phylogeny of Eurasian teleoceratines» подготовлена для представления в Zoological Journal of the Linnean Society. Авторы: Sizov, Alexander (входит в состав вспомогательного персонала проекта), Klementiev, Alexey, and Antoine, Pierre-Olivier. В статье описывается скелет недавно обнаруженного раннемиоценового носорога на местонахождении Тагай-1 (остров Ольхон, озеро Байкал), где в результате многолетних исследований найдено большое количество ископаемых остатков крупных и мелких млекопитающих, птиц, рептилий, амфибий, рыб и моллюсков. Пересматривается филогения евразийских носорогов телеоцератин, распространенных на территории Евразии на протяжении всего миоцена. 1.4.5. Статья "Earthquake geology of the Mondy Fault (SW Baikal Rift, Siberia)". Авторы: Arzhannikova A.V., Arzhannikov S.G., Ritz J.-F., Chebotarev A.A., Yakhnenko A.S. Статья сдана для опубликования в Journal of Asian Earth Sciences и сейчас находится на стадии рецензирования.

Мондинский разлом входит в систему северного разломного ограничения Тункинской системы впадин. Она расположена на юго-западном фланге Байкальского рифта в пределах восточной части Алтае-Саянской горной области. Современные тектонические структуры, зафиксированные в Тункинской системе впадин, имеют черты, характерные как для транстенсионного, так и для транспрессионного режима деформации, поэтому кинематика разломов и их сегментов служит предметом дискуссии [Larroque et al., 2001; Аржанникова и др., 2003; 2007; Arjannikova et al., 2004; Парфеевец, Саньков, 2006; Lunina, Andreev, Gladkov, 2015; Лунина и др., 2016; Ritz et al., 2018]. Три активных разлома контролируют развитие Тункинской системы впадин – Главный Саянский разлом в самой восточной части, Тункинский разлом в центральной части и Мондинский разлом в самой западной части (см. рис. 15 в Приложении). Все эти разломы проявляют сейсмическую активность. Наибольшая сейсмическая активность наблюдается в западной части Тункинской системы впадин. Если Тункинский и Главный Саянский разломы активно изучались с точки зрения их кинематики, скорости смещения и сейсмического потенциала [McCalpin and Khromovskikh, 1995; Чипизубов, Смекалин, 1999; Чипизубов и др., 2003; Smekalin et al., 2013; Arzhannikova et al., 2018; Ritz et al., 2018; Chebotarev et al., 2021], то Мондинский разлом до сих пор оставался малоизученным. В зоне этого разлома произошло сильное землетрясение 04.04.1950 с Mw=6.9. Решение механизма очага показало левостороннее сдвиговое смещение вдоль субширотной плоскости, соответствующей простиранию разлома [Delouis et al., 2002]. Предпринимались попытки параметризации разлома и датирования палеоземлетрясений [Arjannikova et al., 2004; Тресков, Флоренсов, 2006; Lunina, Andreev, Gladkov, 2015; Лунина и др., 2016], но ни скорости смещения, ни период повторяемости сильных землетрясений определены не были. Позднеплейстоцен-голоценовая кинематика разлома оставалась дискуссионной.

Для уточнения кинематики разлома и определения периода повторяемости сильных землетрясений были проведены детальные морфотектонические и палеосейсмологические исследования в зоне Мондинского разлома. Исследования включали детальное топографическое картирование поверхностных деформаций с помощью тахеометра, построение и интерпретацию цифровой модели рельефа, вскрытие разлома траншеями, документацию траншей и радиоуглеродное датирование деформированных горизонтов на двух обновленных участках Мондинского сегмента разлома – восточном, в районе Хара-Дабанской перемычки (рис. 16 в Приложении), и западном, в районе западного окончания Мондинской впадины (рис. 17 в Приложении).

Проведенные авторами исследования позволили охарактеризовать возраст палеоземлетрясений, их магнитуду и периодичность повторяемости, что является важной составляющей оценки сейсмического риска. Установлено, что разлом сегментирован и соответствует левому сдвигу со взбросовой составляющей, что подтверждает недавнюю инверсию тектонического режима на юго-западном фланге Байкальского рифта в позднем плейстоцене–голоцене. По совокупности морфотектонических и палеосейсмологических данных оценены скорость смещения по Мондинскому разлому в 1,3–1,5 мм/год за последние ~13,6 тыс. лет и средний интервал повторяемости в ~4 тыс. лет. Этот интервал совпадает со средним интервалом повторяемости сильных разрывообразующих землетрясений, наблюдаемых вдоль восточных участков Тункинского и Главного Саянского разломов (Ritz et al., 2018), и время их проявления для этих трех разломов пересекается (рис. 18 в Приложении). Это позволяет предположить, что все три разлома могли вскрываться одновременно или во время общих сейсмических кластеров. Изложенные результаты показывают, что разломы Тункинской системы впадин представляют сильную сейсмическую опасность для региона, в частности, г. Иркутска, и дают характеристику сейсмического потенциала Мондинского разлома.

Описание выполненных в отчетном периоде работ и полученных научных результатов

В Монголии выполнены экспедиционные работы, посвященные активным разломам и связанным с ними сейсмическим событиям. Определялись форма и кинематика активных разломов и проявления палеосейсмичности. На западном борту субмеридиональной Хубсугульской грабенообразной впадины выявлены и закартированы следы землетрясения 12.01.2021 г. с Мw=6.7. Сейсмотектонический разрыв представлен правым сбросо-сдвигом с амплитудой смещения до 20 см в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Разрыв простирается на CC3 и прослежен на ~250 м. В траншее, пройденной поперек разломного уступа, выявлены сброс со смещением почвы на 15-20 см и следы трех предыдущих землетрясений. В районе субмеридиональной Дархатской грабенообразной впадины изучены три субмеридиональные сбросовые сейсмодислокации и система субширотных взбросов и надвигов Хулган на юге между продолжениями сбросов Дархатской и Хубсугульской впадин. Выявлены следы, как минимум, двух палеоземлетрясений. Исследован Дунганский активный правый сдвиг, протягивающийся на 30 км на север от области сочленения крупнейших левых сдвигов Центральной Монголии, Хангайского широтного и Цэцэрлэгского ВСВ простирания. Тренчинг выявил следы подвижки при Болнайском землетрясении 26.07.1905 г. с М≥8 в зоне Хангайского разлома. Исследована активизированная землетрясением 9.07.1905 г. с М~8.0 часть Цэцэрлэгского активного разлома на левом берегу р. Тэсийн-Гол (Тэс-Хем). Обнаружены следы землетрясения 1905 г. и одного палеоземлетрясения. На западе Хемчикской впадины Тувы в 170 м южнее уйгурской крепости Малгаш-Бажын обнаружен субширотный левый взбросо-сдвиг, прослеженный на 10.5 км. Стены крепости деформированы в связи с сильным землетрясением 835-840 г.

На северном борту Котловины Больших Озер к северу от оз. Хиргис-Нур изучены неогенчетвертичные обнажения, на которые надвинута юрская толща южного склона хр. Хан-Хухийн. В неогеновой свите Хиргис-Нур найдено большое количество ископаемой фауны крупных и мелких млекопитающих, птиц, рыб и моллюсков. На основе ревизии ранее собранного фаунистического материала и находок 2022 г. возраст свиты признан позднемиоценовым. Отложения того же облика со сходной фауной изучено нами на северном борту Убсунурской впадины.

Подготовлены и сданы в рецензируемые журналы пять статей.

Статья "Khangay intramantle plume in Mongolia: 3D model, influence on Cenozoic tectonics of the lithosphere, and comparison with other mantle plumes" (Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., Sokolov S.A., Maznev S.V., Yushin K.I. and Demberel S.) представлена для опубликования в Journal of Asian Earth Sciences. Выполнено сопоставление внутримантийного Хангайского плюма с кайнозойской структурой северной части Центральной Азии в пределах региона, ограниченного координатами 42°– 58° с.ш., 88°–118° в.д. Хангайский плюм – это обширный объем мантии с пониженными скоростями Р-волн, расположенный под Гобийским Алтаем, Хангайским нагорьем и его северным продолжением до Тувы и восходящий с глубины ~1300 км. На глубинах 800–1000 км от него отделяется Хэнтэйская ветвь, расположенная в области Хэнтэйского нагорья. В верхней мантии плюм расширяется и характеризуется наиболее пониженными скоростями Р-волн. Потоки от Хангайского плюма и его Хэнтэйской ветви распространяются в Забайкалье, где они сливаются с низкоскоростными объемами мантии, проникающими туда от активной окраины Тихого океана. Хангайский и соседний Тибетский плюмы восходят из верхней части нижней мантии.

Кайнозойская структура региона образована поднятиями, впадинами и разломами. Различаются два структурных паразенеза. Первый, Хангайский, парагенез образован сводовыми поднятиями Хангайского и Хэнтэйского нагорий и поясами впадин вокруг них. Это С-образный пояс впадин вокруг Хангайского и пояс плоских прогибов, ограничивающий Хангайское и Хэнтэйское нагорья с юго-востока. Первый парагенез развивалсяись с позднего олигоцена. Второй парагенез лучше всего выражен активными разломами региона, но развивался одновременно с первым парагенезом. Среди активных разломов доминируют сдвиги. Разломы развиваются под действием латеральных сил СВ–ЮЗ сжатия и СЗ–ЮВ растяжения, причем на западе и в центре региона доминируют условия транспрессии, а на СВ – растяжения и транстенсии. Строение Хангайского парагенеза указывает на его формирование в результате вертикального давления и связанных с ним радиальных сил. Парагенез совпадает с областью распространения Хангайского плюма и его ветвей и обусловлен воздействием плюма. Второй парагенез обусловлен латеральным взаимодействием плит и блоков литосферы, а именно, отодвиганием Амурской плиты от Сибирской платформы на восток и сближением Сибирской платформы с литосферными блоками юга Центральной Азии в результате Индо-Азиатской коллизии. Таким образов, парагенезы связаны с геодинамическими процессами, происходящими на разных уровнях тектоносферы.

Статья "Earthquake geology of the Mondy Fault (SW Baikal Rift, Siberia)" (Arzhannikova A.V., Arzhannikov S.G., Ritz J.-F., Chebotarev A.A., Yakhnenko A.S.) представлена в Journal of Asian Earth Sciences.. Мондинский разлом является самым западным в системе северного разломного ограничения Тункинской системы впадин. Установлено, что разлом является левым взбросо-сдвигом. Скорость смещения по Мондинскому разлому составляет 1.3–1.5 мм/год за последние ~13.6 тыс. лет, а средний интервал повторяемости сильных землетрясений – около 4 тыс. лет. Этот интервал и возраст землетрясений примерно совпадает с таковыми в зонах расположенных восточнее Тункинского и Главного Саянского разломов.

Статья «Локализация очага сильного исторического землетрясения в Центральной Туве с использованием фольклорно-исторических и палеосейсмологических данных» Овсюченко А.Н., Бутанаева Ю.В. и Кошевого Н.Г. представлена для опубликования в журнал «Геотектоника». Использована былина «Улу-Дуне», где сообщается, что во время изгнания китайских захватчиков произошло обрушение берегов р. Енисей вблизи горы Джарга. Описанные явления имеют признаки сильного землетрясения, датированного интервалом 1715–1758 гг. Выполненные исследования обнаружили в подножии горы Джарга сейсмотектонические смещения в зоне Кызыльского разлома. Разлом прослежен на 27 км и является левым взбросо-сдвигом. Зафиксированы одноактные левосдвиговые смещения исторического времени на 50–70 см и суммарные позднеголоценовые смещения на 4–5 м.

Статья «Новейшая структура северного обрамления Убсунурской впадины (Тыва, Россия) и ее соотношение с активными разломами» Соколова С.А., Гариповой С.Т., Бутанаева Ю.В., Зеленина Е.А., Юшина К.И., Овсюченко А.Н. и Мазнева С.В. представлена для опубликования в журнал «Геотектоника». В пограничной области между Убсунурской впадиной и в соседними хребтами Центральный и Восточный Танну-Ола и Сангелен выявлены два парагенеза разломов. Первый парагенез образован Северо-Убсунурским скрытым надвигом и принадвиговыми деформациями и развивался в течение всего неогена и квартера, хотя его проявления в позднечетвертичное время ослабели. Он обеспечил многосотметровые вертикальные смещения. Южно-Таннуольский и Эрзин-Агардагский левые взбросо-сдвиги второго парагенеза секут границы впадины и проявляют признаки активности в позднем плейстоцене и голоцене. Развитие второго парагенеза происходило после интенсивного развития первого парагенеза.

Статья «An early Miocene skeleton of Brachydiceratherium Lavocat, 1951 (Mammalia, Perissodactyla) from the Baikal area, Russia, and a revised phylogeny of Eurasian teleoceratines». Авторы: Sizov, Alexander (входит в состав вспомогательного персонала проекта), Klementiev, Alexey, and Antoine, Pierre-Olivier. Статья подготовлена для представления в Zoological Journal of the Linnean Society. Описывается скелет недавно обнаруженного раннемиоценового носорога на местонахождении Тагай-1 (остров Ольхон, озеро Байкал). Пересматривается филогения евразийских носорогов телеоцератин, распространенных на территории Евразии на протяжении всего миоцена.

Таким образом, план работ 2022 г. выполнен, и заявленные результаты достигнуты.

Перечень публикаций в отчетном периоде по результатам проекта

1. Трифоно В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Мазнев, С.В., Юшин К.И., Дэмбэрел С. (Vladimir G. Trifonov, Sergey Y. Sokolov, Sergey A. Sokolov, Stepan V. Maznev, Kirill I. Yushin, Sodnomsambuu Demberel) Khangay intramantle plume in Mongolia: **3D** model, influence on Cenozoic tectonics of the lithosphere, and comparison with other mantle plumes // Journal of Asian Earth Sciences (2023 г.) ^{WOS} SCOPUS Q1

2. Соколов С.А., Гарипова С.Т., Юшин К.И., Бутанаев Ю.В., Зеленин Е.А., Овсюченко А.Н., Мазнев С.В. (Sokolov S.A., Garipova S.T., Yushin K.I., Zelenin E.A., Ovsyuchenko A.N., Maznev S.V.) Новейшая структура северного обрамления Убсунурской впадины: и ее соотношение с активными разломами (Тыва, Россия) // Геотектоника (2023 г.) ^{WOS} SCOPUS RSCI РИНЦ

Представление научных результатов на научных мероприятиях

Устный доклад: Кошевой Н.Г., Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В. Предварительные результаты структурно-геоморфологических исследований очаговой зоны Хубсугульского землетрясения 12.01.2021, Mw=6.7 (Северная Монголия). // Материалы всероссийской научной конференции «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов», посвященной 75-летию со дня рождения Е.А. Рогожина (1947–2021) и 115-летию со дня рождения В.В. Белоусова (1907–1990). М.: Издательство «Перо», 2022. С. 66-69.

Устный доклад: Гарипова С.Т., Соколов С.А., Бутанаев Ю.В., Юшин К.И. Зеленин Е.А., Мазнев С.В. Соотношение активных разломов и новейшей структуры обрамления северо-востока Убсунурской впадины. // Материалы всероссийской научной конференции «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов» М.: Издательство «Перо», 2022. С. 152 – 159

Приложение (рисунки) на следующей странице



Рис. 1. Неотектоническая карта Монголии, юга Сибири и Байкальского региона

Буквенные обозначения: БО Котловина Больших Озер, БУ Бусийнгол, грабенообразная впадина, ВС Восточный Саян, ГА Гобийский Алтай, ГС Главный Саянский разлом, ДА Дархат, грабенообразная впадина, ДО Долина Озер, ДУ Дунганский разлом, МА Монгольский Алтай, МР Мондинский разлом, КА Каахемский разлом, КО Кобдинский разлом, ОЛ о-в Ольхон, СБ Северная впадина Байкала, ТВ Тувинская впадина, ТО Танну-Ола, ТУ Тункинская впадина, ТЦ Тэрхийн-Цагаан-Нур, УН Убсунурская впадина, ХА Хангайское нагорье, ХЕ Хемчикская впадина, ХН Хиргис Нур, ХР Хангайский разлом, ХУ Хубсугул, грабенообразная впадина, ХХ Хан-Хухийн, ХЭ Хэнтэйское нагорье, ЦБ Центральная впадина Байкала, ЦШ Цаган-Шибету, ЦЭ Цэцэрлэгский разлом, ШР Шапшальский разлом, ЭА Эрзин-Агардагский разлом, ЮБ Южная впадина Байкала, ЮТ Южно-Таннуольский разлом



Рис. 2. Объемное изображение вариаций скоростей *P*-волн δV_p , основанное на модели МІТРО8 (Li et al., 2008). Вид с СЗ; *а* широтный и меридиональный разрезы δV_p (%); b те же разрезы с изоповерхностью 0.22%. Вблизи пересечения разрезов видны главное тело Хангайского плюма на широтном разрезе и его Хэнтэйская ветвь и низкоскоростные объемы Забайкалья на меридиональном разрезе



Рис. 3. Космоснимок субмеридиональных впадин юго-западного фланга Байкальского рифта. Красным пунктиром показаны главные сейсмогенные разломы Дархадской впадины, желтыми квадратами места проведения полевых морфотектонических и тренчинговых работ.



Рис. 4. Геологические эффекты Хубсугульского землетрясения. Кружком показан эпицентр землетрясения по данным [Еманов и др., 2021]. Слева общая карта активных разломов района оз. Хубсугул по данным [Бачманов и др., 2017] с положением района детальных исследований.

1 сейморазрыв; 2 тектонические уступы; 3 обвалы; 4 камнепады; 5 сейсмовибрационные трещины; 6 выбросы песка (разжижения); 7 максимальная плотность афтершоков (35 47 в пределах круга радиусом 0.02°) по данным: [Еманов и др., 2021]; 8 изосейста 8 баллов (контур эпицентральной зоны).



Рис. 5. Фото и зарисовка траншеи, пройденной вкрест простирания уступа, обновленного при землетрясении 2021 г.



Рис. 6. Тектонический уступ на поверхности 1-ой надпойменной террасы долины р. Бэлтэсийн-Гол в т. 14 на юго-восточной окраине Дархатской впадины.



Рис. 7. Тектонические уступы и рвы в т. 17 на юго восточной окраине Дархатской впадины, аэрофотоплан.



Рис. 8. Аэрофотоплан участка сейсморазрыва 1905 г. в зоне Цэцэрлегского разлома с положением пройденных траншей (квадрат)



Рис. 9. Положение обследованных обнажений неоген-четвертичных пород и надвига юрких пород на кайнозойские.



Рис. 10. Надвигание юрских конгломератов на неоген четвертичные отложения Хиргиснурской впадины



Рис. 11. Фото Дунганской зоны сейсморазрывов



Рис. 12. Плато базальтов и вулканический конус в районе оз. Тэрхийн-Цагаан-Нур



Рис. 13. Активные разломы на западе Хемчикской впадины с положением уйгурских крепостей



Рис. 14. Активные и новейшие разломы центрального сегмента хр. Танну-Ола



Рис. 15. Тункинская система впадин. Фокальный механизм Мондинского землетрясения в проекции нижней полусферы показан по данным (Delouis et al., 2002). Кинематика разломов приведена по данным (Чипизубов, Смекалин, 1999; Чипизубов и др., 2003; Ritz et al., 2018)



Рис. 16. Морфотектонические и палеосейсмологические исследования в зоне Мондинского разлома (западный участок).



Рис. 17. Морфотектонические и палеосейсмологические исследования в зоне Мондинского разлома (восточный участок).



Рис. 18. Возрастные ограничения палеосейсмических событий, полученные для Главного Саянского (Восточно-Саянская ПСД), Тункинского (Торская ПСД) и Мондинского разломов.

- Аржанников С.Г., Аржанникова А.В. Палеосейсмогенная активизациябольшеозерского сегмента Эрзино-агардагского разлома // Вулканология и сейсмология. 2009 № 2. С. 56–66.
- *Аржанникова А.В.* Морфоструктурная эволюция Байкальского региона и Забайкалья в позднем мезозое и кайнозое. Дисс. доктора геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. 410 с.
- Аржанникова А.В., Ларрок К., Аржанников С.Г. К вопросу о голоценовом режиме деформаций в районе западного окончания системы Тункинских впадин (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 4. С. 373–379.
- Аржанникова А.В., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Позднечетвертичный и современный режимы деформирования западной части Тункинской системы впадин по структурногеоморфологическим и сейсмологическим данным // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 4. С. 391–400.
- Аржанникова А.В., Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. Позднекайнозойская кинематика активных разломов Хубсугульской впадины (юго-западный фланг Байкальской рифтовой системы) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1202–1224.
- Белостоцкий И.И. Очерки по истории рельефа Тувы. // Труды ВАГТ, 1958, Вып. 4.
- *Вдовин В.В., Зеленков П.Я.* Сейсмогенные формы рельефа Тувы и Западного Саяна. // Закономерности развития рельефа Северной Азии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 99–106.
- Геология СССР. Том XXIX. Тувинская АССР. Часть І. М.: Недра, 1966. 459 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская Лист М-46 Кызыл. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. Девяткин Е.В. Кайнозой Внутренней Азии (стратиграфия, геохронология и корреляция). М.: Наука, 1981. 196 с.
- *Девяткин Е.В.* Кайнозой Внутренней Азии: стратиграфия, геохронология, корреляция. М.: Наука, 1981. 200 с.
- Девяткин Е.В., Малаева Е.М., Зажигин В.С. и др. Поздний кайнозой Монголии (стратиграфия и палеогеография). М.: Наука, 1989. 213 с.
- *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В. и др.* Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 г. Мw = 6.7, ML = 6.9 и афтершоки начального периода. // Физика Земли. 2022. № 1. С. 83–89.
- Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1188–1203.
- Зайцев Н.С. О плиоценовых осадках и молодых движениях в хр. Танну-Ола. // Докл. АН СССР, 1947. Т. 57, № 9.
- Зорин Ю.А., Балк Т.В., Новоселова М.Р., Турутанов Е.Х. Мощность литосферы под Монгольско-Сибирской горной страной // Известия АН СССР. Физика Земли. 1988. № 7. С. 32–42.
- Кызласов Л.Р. Древняя Тува (от палеолита до IX в.). М.: МГУ, 1979. 207 с.
- Кочетков В.М., Хилько С.Д., Зорин Ю.А. и др. Сейсмотектоника и сейсмичность Прихубсугулья. Новосибирск: Наука, 1993. 184 с.
- *Логачев Н.А.* Об историческом ядре Байкальской рифтовой зоны // Доклады РАН. 2001. Т. 378, № 4. С. 510–513.
- *Логачев Н.А.* История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 446 № 5. С. 391–406.
- *Логачев Н.А., Антощенко-Оленев И.В., Базаров Д.Б. и др.* Нагорья Байкальского региона и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 360 с.
- *Логачев Н.А., Ломоносова Т.К., Климанова В.М.* Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра. М.: Наука, 1964. 196 с.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Афонькин А.М., Серебряков Е.В. Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 9. С. 1616–1633.

- *Мац В.Д.* Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2012. Т. 53, № 9. С. 1219–1244.
- *Мац В.Д.* Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 467–489. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0190.
- *Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др.* Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил."Гео",2001.252с.
- Николаев В.Г., Ванякин Л.А., Калинин В.В., Милановский В.Е. Строение осадочного чехла озера Байкал // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1985. Т. 60, вып. 2. С. 48–58.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Геодинамические условия развития Тункинской ветви Байкальской рифтовой системы // Геотектоника. 2006. № 5. С. 61–84.
- Певзнер М.А., Вангенгейм Э.А., Жегалло В.И. и др. Корреляция отложений позднего неогена Центральной Азии и. Европы по палеомагнитным и биостратиграфическим данным // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1982. № 6. С. 5–16.
- Попова С.М. Пресноводные моллюски неогеновой толщи Убсунурской впадины (Тувинская АССР)// Мезозойские и кайнозойские озера Сибири : АН СССР. Сиб. отдние. Лимнол. ин-т; А.П. Жузе и Н. А. Флоренсов (отв. редакторы). М.: Наука, 1968. С. 32–252.
- *Прудников С.Г.* Закономерности размещения россыпей золота в морфоструктурах Тувы и Западного Саяна. Дисс. кандидатаа геол.-мин. наук. Кызыл: ТИКОПР СО РАН, 2004. 282 с.
- *Рассказов С.В.* Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд, 1993. 288 с.
- *Рассказов С.В., Брандт С.Б., Брандт И.С., Иванов А.В.* Радиоизотопная геология в задачах и примерах. Новосибирск: ГЕО, 2005. 268 с.
- Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Геохронология и геодинамика в позднем кайнозое (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия. Новосибирск: Наука, 2000. 288 с.
- Рассказов С.В., Саньков В.А., Ружич В.В., Смекалин О.П. Путевовитель геологической экскурсии в Тункинскую рифтовую долину. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 40 с.
- *Раковец О.А.* Неотектоника Тувы. // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, 1978. С. 48–58.
- Самдан А.А. Тувинские монголоязычные летописи. Абакан: ТИГПИ, 2016. 185 с.
- Тимошкина Е.П., Михайлов В.О., Смирнов В.Б., Волкова М.С., Хайретдинов С.А. Модель поверхности разрыва Хубсугульского землетрясения 12.01. 2021 по данным спутниковой РСА интерферометрии // Физика Земли. 2022. № 1. С. 83–89.
- *Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М., Соколов С.А., Трихунков Я.И.* Неотектоника и строение верхней мантии Центральной Азии // Геотектоника. 2021. № 3. С. 31–59.
- *Тресков А.А., Флоренсов Н.А.* Мондинское землетрясение (отчет о результатах предварительного изучения землетрясения 4 (5) апреля 1950 года) // Андрей Алексеевич Тресков. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2006. С. 166–188.
- *Тулуш Д.К.* Фортификационные сооружения на территории Республики Тыва (сер. I тыс. до н.э. сер. I тыс. н.э.): Автореф. дис. кан. ист. наук. Кемерово, 2015. 22 с.
- Флоренсов Н.А. К проблеме горообразования во Внутренней Азии // Геотектоника. 1965. № 4. С. 3–14.
- Хатчинсон Д.Р., Гольмшток А.Ю., Зоненшайн Л.П. и др. Особенности строения осадочной толщи озера Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки // Геология и геофизика. 1993. Т. 34, № 10–11. С. 25–36.
- Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М. и др. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 225 с.

- *Чернов Г.А., Зеленков П.Я.* Сейсмогеология области Западно-Тувинских поднятий. // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, 1978. С. 58–68.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связаные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т.40. № 6. С. 936–947.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения в зоне Тункинского разлома (Юго-Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2003. Т.44. № 6. С. 587–602.
- Шорыгина Л.Д. Стратиграфия кайнозойских отложений Западной Тувы // Тр. ГИН РАН. Вып. 26. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 165–203.
- Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И. и др. Динамика формирования и магматизм позднемезозойско-кайнозойской Южно-Хангайской горячей точки мантии (Монголия) // Геотектоника. 1994. № 5. С. 28–45.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойскаякайнозойская вулканическая провинция Азии – проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41–67.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Самойлов В.С. Тектоническое положение позднекайнозойского вулканизма Центральной Азии // Геотектоника. 1991. № 1. С. 69–83.
- Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А. Позднемезозойская магматическая провинция востока Азии: строение, магматизм и условия формирования // Геотектоника. 2019. № 4. С. 60–77.
- *Arjannikova A., Larroque C., Ritz J.-F., Déverchère J., Stéphan J.-F., Arjannikov S., San'kov V.* Geometry and kinematics of recent deformation in the Mondy-Tunka area (south-westernmost Baikal rift zone, Mongolia-Siberia) // Terra Nova. 2004. V. 16. № 5. P. 265–272.
- Arzhannikova A., Arzhannikov S., Braucher R., Jolivet M., Aumaître G., Bourlès D., Keddadouche K. Morphotectonic analysis and 10Be dating of the Kyngarga river terraces (southwestern flank of the Baikal rift system, South Siberia) // Geomorphology. 2018. V.303. P. 94–105.
- *Arzhannikova A., Arzhannikov S., Jolivet M., Vassallo R., Chauvet A.* Pliocene to Quaternary deformation in South East Sayan (Siberia): initiation of the Tertiary compressive phase in the southern termination of the Baikal Rift System // Journal of Asian Earth Sciences. 2011. V. 40. P. 581–594.
- Battogtokh D., Bayasgalan A., Wang K., Ganzorig D., Bayaraa J. The 2021 Mw=6.7 Khankh earthquake in the Khuvsgul rift, Mongolia. // Mongolian Geoscientist. 2021. 26(52). P. 46–61.
- *Bono, R.K., Tarduno, J.A., Bunge, H.P.* Hotspot motion caused the Hawaiian-Emperor Bend and LLSVPs are not fixed // Nature Communications. 2019. 10:3370. https://doi.org/10.1038/s41467-019
- Chebotarev A., Arzhannikova A., Arzhannikov S. Long-term throw rates and landscape response to tectonic activity of the Tunka Fault (Baikal Rift) based on morphometry // Tectonophysics. 2021. V. 810. 228864.
- *De Grave J., Buslov M.M., Van den haute P.* Distant effects of India-Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology // Journal of Asian Earth Sciences. 2007. V. 29. P. 188–204.
- De Grave J., De Pelsmaeker E., Zhimulev F.I., Glorie S., Buslov M.M., Van Den Haute P. Meso-Cenozoic building of the Northern Central Asian Orogenic Belt: Thermotectonic history of the Tuva Region // Tectonophysics. 2014. V. 621. P. 44–59.
- De Grave J., Dehandschutter B., Van den haute P., Buslov M.M., Boven A. Low-temperature thermotectonic evolution of the Altai-Sayan mountains, South Siberia, Russia // Geophysical Research Abstracts. 2003. V. 5. 11996.
- De Grave J., Van den Haute P., Buslov M.M., Dehandschutter B., Glorie S. Apatite fission-track thermochronology applied to the Chulyshman Plateau, Siberian Altai Region // Radiation Measurements. 2008. V. 43. P. 38–42.
- Delouis B., Déverchère J., Melnikova V., Radziminovitch N., Loncke L., Larroque C., Ritz J.F., Sankov V. A reappraisal of the 1950 (Mw 6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone // Terra Nova. 2002. V. 14. P. 491–500.

- He Y.; Wang T.; Zhao L. The 2021 Mw6.7 Lake Hovsgol (Mongolia) Earthquake: Irregular Normal Faulting with Slip Partitioning Controlled by an Adjacent Strike-Slip Fault. // Remote Sens. 2022. 14. 4553.
- *Huang, J., Zhao, D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111, B09305, doi: 10.1029/2005JB004066
- Huang, Zh., Zhao, D. Seismotectonics of Mongolia and Baikal Rift zone controlled by lithospheric structures // Geophysical Res. Letters. 2022. Vol. 49, e2022 Gl099525. https://doi.org/10.1029/2022GL099525.
- Jolivet, M., Ritz, J.-F., Vassallo, R. et al. Mongolian summits: An uplifted, flat, old but still preserved erosion surface // Geology. 2007. Vol. 35, No. 10. P. 871–874.
- Karakhanian A. S., Trifonov V. G., Ivanova T. P., et al. Seismic deformation in the St. Simeon Monasteries (Qal'at Sim'an), Northwestern Syria // Tectonophysics. 2008. Vol. 453. P. 122– 147
- Krivonogov, S.K., Safonova, I.Y. Basin structures and sediment accumulation in the Baikal Rift Zone: Implications for Cenozoic intracontinental processes in the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Research. 2017. Vol. 47. P. 267–290; <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2016.11.009</u>.
- *Kulakov, I.Yu.* Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia, from regional seismic tomography // Russian geology and Geophysics. 2008. Vol. 49, No. 3. P. 187–196.
- Larroque C., Ritz J.F., Stéphan J.F., Sankov V., Arjannikova A., Calais E., Deverchere J., Loncke L. Interaction compression-extension a la limite Mongolie-Siberie:analyse preliminaire des deformations recentes et actuelles dans le bassin de Tunka // C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planetes // Earth and Planetary sciences. 2001. № 332. P. 177–184.
- Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., et al. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. Vol. 9. № 5. P. 1–21.
- *Liu X., Xu W., Radziminovich N.A., Fang N., Xie L.* Transtensional coseismic fault slip of the 2021 Mw 6.7 Turt Earthquake and heterogeneous tectonic stress surrounding the Hovsgol Basin, Northwest Mongolia. // Tectonophysics. 2022. Vol. 836. 229407.
- Lunina O., Andreev A., Gladkov A. The 1950 Mw=6.9 Mondy earthquake in southern East Siberia and associated deformations: facts and uncertainties // J. Seismol. 2015. Vol.19. P. 171–189.
- *McCalpin J.P., Khromovskikh V.S.* Holocene paleoseismicity of the Tunka fault, Baikal rift, Russia // Tectonics. 1995. Vol. 14, No. 3. P. 594–605.
- Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., et al. Intensity scale ESI 2007. // Special paper APAT, Memorie descritive della carta geologica d'Italia. 2007. Vol. 74. P. 41.
- *Radziminovich N.A., Bayar G., Miroshnichenko A.I., et al.* Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings // Geodynamics & Tectonophysics, 2016. Vol. 7, No. 1. P. 23–38.
- *Ritz J.-F., Arzhannikova A., Vassallo R., Arzhannikov S., Larroque C., Michelot J.-L., Massault M.* Characterizing the present-day activity of the Tunka and Sayan faults within their relay zone (western Baikal rift system, Russia) // Tectonics. 2018. V. 37. P. 1376–1392
- Rizza M., Ritz J-F., Prentice C., et al. Earthquake geology of the Bolnay fault (Mongolia) // Bulletin of Seismol. Soc. of Amer. 2015. V. 105. № 1. P. 72–93.
- Shchetnikov, A.A., White, D., Filinov, I.A., Rutter, N. Late Quaternary geology of the Tunka rift basin (Lake Baikal region), Russia // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. Vol. 46. P. 195– 208; doi:10.1016/j.jseaes.2011.12.010.
- Smekalin O.P., Shchetnikov A.A., White D. Arshan palaeoseismic feature of the Tunka fault (Baikal rift zone, Russia) // [in special issue: Geology of Baikal Region] Journal of Asian Earth Sciences. 2013. V. 62. P. 317–328.
- *Vassallo R., Ritz J-F., Braucher R., et al.* Transpressional tectonics and stream terraces of the Gobi-Altay, Mongolia // Tectonics. 2007. V. 26. TC5013. P. 1–24.
- *Windley, B.F., Allen, M.B.* Mongolia plateau: evidence for a late Cenozoic mantle plume beneath central Asia // Geology. 1993. Vol. 21. P. 295–298.
- Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovsky A.M., Lebedev V.A., Savatenkov V.M. Late Mesozoic-Cenozoic intraplate magmatism in Central Asia and its relation with mantle

diapirism: Evidence from the South Khangai volcanic region, Mongolia // J. Asian Earth Sci. 2015. Vol. 111. P. 604–623.

Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.Kh., Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere of the Mongolian-Siberian mountainous province // J. Geodynam. 1990. Vol. 11. P. 327–342.