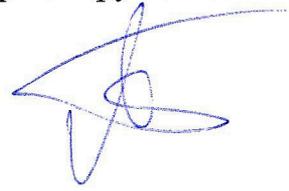


*На правах рукописи*



**Чеботарев Алексей Александрович**

**МОРФОТЕКТОНИКА ГОРНОГО ФРОНТА ТУНКИНСКИХ ГОЛЬЦОВ И  
ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ТУНКИНСКОЙ  
СИСТЕМЕ ВПАДИН**

Специальность 1.6.1 - Общая и региональная геология. Геотектоника и  
геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**ИРКУТСК 2023**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН).

**Научный руководитель:**

**Аржанников Сергей Геннадьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Стром Александр Леонидович** - доктор геолого-минералогических наук, главный специалист «НИИЭС» – филиал АО «Институт «Гидропроект» (г. Москва).

**Новиков Игорь Станиславович** - доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук (ИГ СО РАН, г. Иркутск).

Защита состоится «5» декабря 2023 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.062.02. при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull244/3961.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета, кандидату геолого-минералогических наук Данилову Борису Станиславовичу по вышеуказанному адресу или e-mail: [boris@crust.irk.ru](mailto:boris@crust.irk.ru). Тел: 8(3952)511680.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.1.062.02  
кандидат геолого-минералогических наук



Б.С. Данилов

## ВВЕДЕНИЕ

### Объекты исследований

Объектами исследований являлись: ключевые маркеры тектонической активности Тункинского разлома - фасеты и водосборные бассейны; верхний ярус рельефа Тункинских Гольцов и хребта Хамар-Дабан; позднечетвертичное осадочное заполнение Тункинской системы впадин, включающее речные террасы, моренные комплексы, песчаные массивы. Предметом исследований являлась совокупность процессов, формирующих рельеф, взаимосвязь эрозионных и аккумулятивных процессов в экзолитодинамическом потоке в условиях глобального изменения климата и инверсии тектонических движений.

### Актуальность темы исследования

Высокая степень изученности геологической истории Тункинской системы впадин (ТСВ) оставляет, тем не менее, большое количество нерешенных вопросов относительно некоторых аспектов структурной эволюции этого сегмента Байкальской рифтовой системы (БРС) и формирования рельефа. В настоящей работе представлены новые данные о строении, возрасте и динамике развития Тункинской секции БРС. Данные основаны на количественных оценках параметров рельефообразующих процессов, проведенных впервые с применением новых методов. Работа восполняет пробелы в исследованиях рельефа Тункинской системы впадин, решает дискуссионные вопросы относительно возраста и генезиса отдельных геоморфологических структур. Использованные в исследовании методы вносят вклад в понимание влияния изменений тектонического режима и климатических условий в позднем плейстоцене на геоморфологический отклик ландшафта.

### Цели работы

Оценка взаимосвязи процессов рельефообразования и седиментации в пределах ТСВ с активными тектоническими процессами и глобальными изменениями климата.

### Задачи исследований

1. Определить основные параметры элементов горного фронта с использованием данных ДДЗ, для выявления закономерностей современной тектонической активности различных сегментов Тункинского разлома.
2. Определить геоморфологический отклик эрозионно-руслевой системы на тектоническую активность Тункинского разлома с использованием набора морфологических параметров водосборных бассейнов Тункинского хребта;
3. Установить взаимосвязь между морфометрическими параметрами и кинематикой различных участков Тункинского разлома.
4. Оценить долгосрочные скорости смещений для конкретных геоморфологических сегментов горного фронта и определить возраст образования соответствующих геоморфологических структур ТСВ по данным морфометрии.
5. Определить морфометрические параметры гравитационных смещений.
6. Создать карту распространения обвально-оползневых тел, выявить зависимости их распространения и приуроченность к сейсмогенерирующим структурам.
7. Провести дистанционное исследование по оценке объемов денудационного сноса за разные периоды времени.
8. На основе данных из новых опорных разрезов четвертичных отложений с применением разных методов датирования получить информацию о динамике осадконакопления в ТСВ.
9. Создать модель накопления Бадарского песчаного массива в пределах погружающейся Тункинской впадины.

## **Методы исследования**

В исследовании использован комплексный подход, включающий геолого-геоморфологические и геохронологические методы. Для получения информации о рельефе применялся морфометрический анализ, дешифрирование данных дистанционного зондирования, структурно-геоморфологический метод. Датирование исследуемых объектов включали традиционные и современные методы: (АМС-метод ( $^{14}\text{C}$ ), метод оптикостимулированной люминисценции (OSL)).

## **Личный вклад автора**

Автор принимал участие на всех этапах исследования, при постановке целей и задач, сборе и обработке фактического материала, полученного в ходе полевых исследований в Тункинской системе впадин в 2018 – 2022 гг. Автором проведена морфометрическая оценка ключевых параметров тектонической активности Тункинского разлома и сделана оценка долгосрочных скоростей смещения по разлому, что позволило создать модель эволюции ТСВ за орогенный период. На основе анализа ДДЗ автором создана карта концентрации обвально-оползневых тел верхнего яруса рельефа в горном обрамлении ТСВ. Также, на основе анализа ДДЗ проведена оценка объемов денудационного сноса в разных структурных подразделениях горного обрамления ТСВ за разные периоды времени. При участии автора изучены новые разрезы четвертичных отложений разных впадин Тункинской системы, проведены исследования по оценке климатического и тектонического факторов в формировании террасовых комплексов р. Иркут, проведены исследования Бадарского песчаного массива. Автор участвовал в отборе проб для датирования, документировании новых разрезов четвертичных отложений, а также в обработке полученных результатов и интерпретации данных.

## **Научная новизна исследования**

1. Впервые для Тункинского разлома получены количественные данные по морфометрии основных маркеров активной тектоники и долгосрочным скоростям смещений по разлому для разных сегментов, создана модель эволюции ТСВ за плиоцен-четвертичный период.
2. Впервые для всей Тункинской системы проведены количественные дистанционные исследования объектов гравитационного/сейсмогравитационного генезиса гольцовой зоны горного обрамления; построена карта концентрации обвально-оползневых тел. Создана база данных обвально-оползневых объектов.
3. Впервые оценены объемы и скорости денудационного процесса для склонов горного обрамления ТСВ за поздний плиоцен-четвертичный и поздний плейстоцен – голоценовый этапы.
4. Получены новые данные о возрасте четвертичных отложений террасовых уровней р. Иркут и песчаного массива Бадар. Предложена новая модель формирования песчаных массивов в Тункинской впадине.

## **Теоретическая и практическая значимость**

Морфометрический анализ ключевых маркеров тектонической активности Тункинского разлома расширил представления об эволюции Тункинской системы впадин и влиянии тектонических процессов на эволюцию ландшафта. Полученные в работе материалы по скоростям смещения по разным сегментам Тункинского разлома дополняют данные об эволюции впадин Байкальской рифтовой системы. Результаты морфометрии главного эскарпа Тункинского разлома, оформленные в базу данных, могут быть использованы в инженерно-геологических исследованиях, направленных на определение потенциальных природных рисков. Показана важная роль крупных обвалов и оползней в формировании объемов денудационного сноса из гольцовой зоны Тункинского хребта. База данных сейсмогравитационных объектов гольцовой зоны горного обрамления ТСВ и построенная карта их концентрации дает представление о связи импульсных деструктивных процессов в

верхнем ярусе гольцов с тектонической активностью по основным разломам, контролирующим развитие Тункинских впадин. Впервые полученные количественные данные об объемах денудационного сноса со склонов хребтов ТСВ дают представления о вкладе эродированного материала в осадочное заполнение Тункинских котловин. Детальное изучение и датирование разрезов верхнего чехла рыхлых отложений Тункинской системы впадин позволило провести палеогеографические реконструкции, получить новые данные о развитии юго-западной части БРС.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Степень достоверности данных о долгосрочных скоростях смещения по сегментам Тункинского разлома, полученных в главе №3 подтверждается тем, что они сопоставимы с аналогичными данными по скоростям смещений по разломам, полученных для других впадин Байкальской рифтовой зоны, оцененным по той же методике. Ряд выводов, сделанных в работе, основаны на новых данных абсолютного датирования (AMS, OSL,  $^{10}\text{Be}$ ), что позволило пересмотреть представления о возрасте некоторых геоморфологических структур, например, Бадарского песчаного массива.

По результатам исследования, связанным с темой диссертации, лично и в соавторстве, было опубликовано 3 работы в рецензируемых журналах (Tectonophysics, 2 в Journal of Asian Earth Sciences), вошедшие в базу данных Web of Science. Основные результаты работы докладывались на конференциях и симпозиумах: XIII и XIV Российско-монгольская международная конференция по астрономии и геофизике «Солнечно-земные связи и геодинамика байкало-монгольского региона» (Институт астрономии и геофизики АН Монголии, 2019; ИЗК СО РАН г. Иркутск, 2023); XXIV Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 75-летию Победы в Великой Отечественной войне (Томск, 2020); Всероссийское совещание с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященное памяти профессора С.И. Шермана (Иркутск, 2021)

### **Основные защищаемые положения**

1. Изучение морфологии горного фронта и водосборных бассейнов южного склона Тункинского хребта, зависящей от особенностей кинематики по разным сегментам Тункинского разлома, позволило определить продолжительность и скорость погружения отдельных элементов Тункинской системы впадин. Опускание Тункинской, Хойтогорской впадины и Ниловского отрога началось 3.2, 3.5 - 1.5, 1.5 млн лет назад, и идет со средней скоростью 1.0, 0.8 и 1.0 мм / год, соответственно.
2. Площадное распределение и плотность обвалов и оползней в гольцовой зоне обрамляющих ТСВ хребтов свидетельствует о связи их формирования с высокой тектонической активностью Тункинского разлома. Долгосрочная, среднесрочная и краткосрочная скорости денудации в верхнем ярусе Тункинских Гольцов составляют 56285 м<sup>3</sup>/г, 26736 м<sup>3</sup>/г, 89286 м<sup>3</sup>/г, соответственно, и определяются импульсными тектоническими движениями и глобальным изменением климата.
3. Геоморфологические элементы верхнего и нижнего ярусов рельефа ТСВ формировались в условиях глобального изменения климата и тектонической инверсии на краевых участках системы. Верхняя часть осадочного чехла сложена: ледниковыми отложениями с возрастом (79-14 тыс. л.); озерными (24-15 тыс. л.), эоловыми (36 тыс. л. - современность), гравитационными и сейсмогравитационными (14 тыс. л. - современность) и речными (101 тыс. л. - современность).

### **Соответствие паспорту специальности 1.6.1.**

Согласно паспорту научной специальности 1.6.1. диссертация соответствует пунктам № 4, 8, 10, 15. В работе смоделирована схема эволюции геоморфологических структур Тункинской системы впадин, что соответствует пункту № 4: «Геодинамические модели формирования структурно-формационных комплексов (осадочных, магматических и метаморфических) применительно к конкретному региону, их сравнительная характеристика». На основании полученных в работе морфометрических данных, рассчитаны вертикальные скорости смещения по отдельным сегментам Тункинского разлома, что соответствует пункту № 8: «Изучение вертикальных и горизонтальных тектонических движений: как современных (инструментальными методами), так и древних (геологическими и палеомагнитными методами)». Также, полученные данные морфометрии основных маркеров активной тектоники позволили оценить особенности кинематики по сегментам Тункинского разлома различного простирания, что попадает под пункт № 10: «Неотектоника, изучение тектонических явления новейшего этапа развития литосферы и ее сегментов разного масштаба, с использованием для этого своих специфические методов исследования». В работе было проведено изучение тектонических объектов, таких, как Тункинский разлом и Тункинская система впадин, что соответствует пункту № 15: «Региональная геотектоника, основанная на выделении и изучении тектонических объектов того или иного региона, страны, континента, океанического или морского бассейна».

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.г.-м.н. С.Г. Аржанникову, д.г.-м.н. А.В. Аржанниковой, руководителю лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН к.г.-м.н. В.А. Санькову, коллегам по лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН, д.г.н. Ю.В. Рыжову, к.г.н. М.Ю. Опекуновой, д.г.-м.н. О.В. Луниной.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-55-15002. Работа была завершена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2019-1883.

# ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ КОНЦЕПЦИЙ ЭВОЛЮЦИИ ТУНКИНСКОЙ СИСТЕМЫ ВПАДИН (ТСВ)

Байкальская рифтовая система (БРС) является крупнейшей внутриконтинентальной тектонической структурой Азии длиной 2000 км, состоящей из цепочки рифтовых впадин и горного обрамления. Большое количество публикаций, касающихся различных аспектов развития БРС, свидетельствует о нарастающем внимании к истории ее геологического развития. Одним из сегментов БРС является Тункинская система впадин (рис. 1), расположенная на ее юго-западном фланге. История геологического изучения этой части БРС насчитывает 150 лет, формирование научных представлений об эволюции ТСВ, как части Байкальской рифтовой системы проходило с накоплением фактического материала и совершенствованием методов исследований.

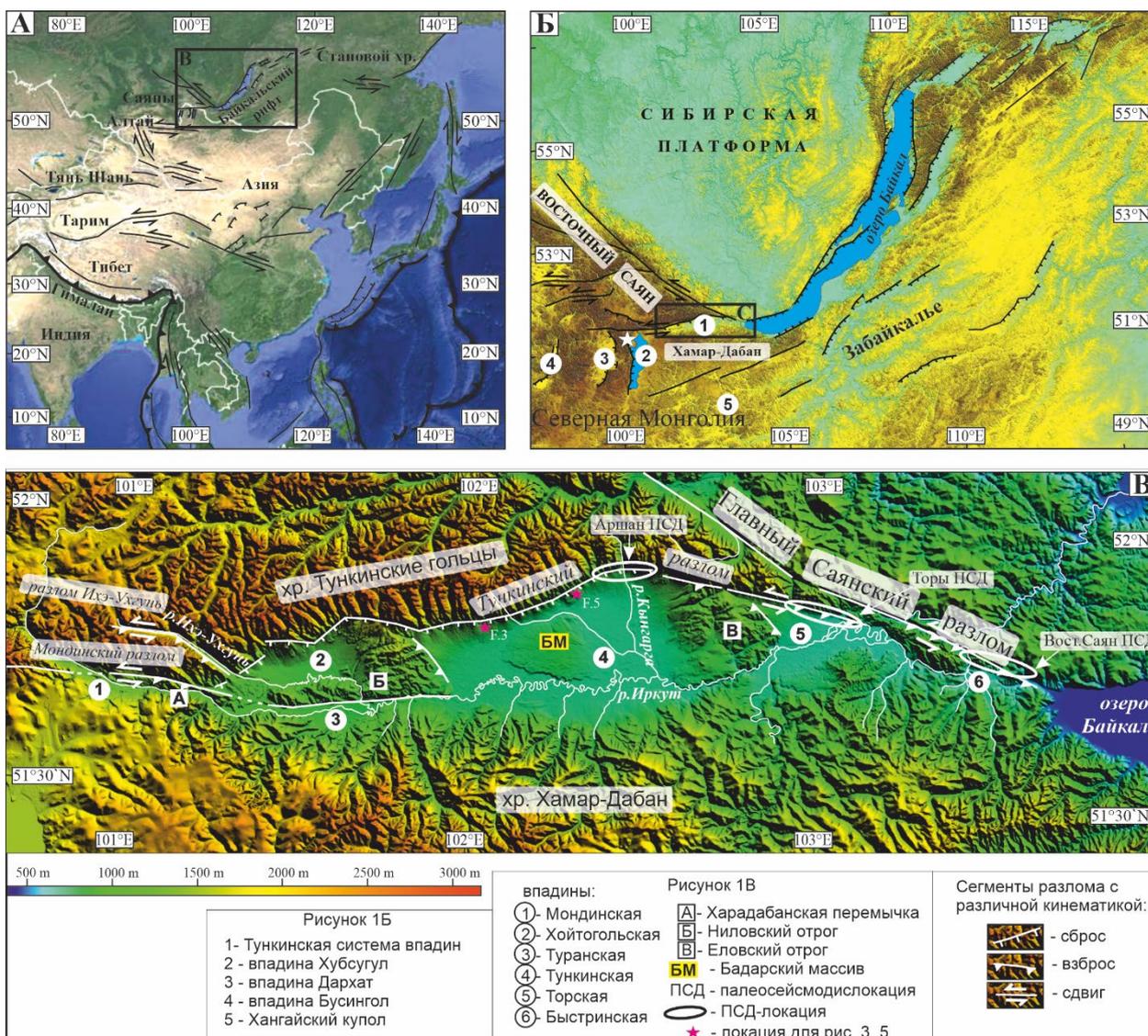


Рис. 1. А. Местоположение района исследований в структурах Азии. Б. Тункинская система впадин показана как элемент Байкальской рифтовой системы, замыкающий его юго-западный фланг. В. Основные структурные элементы Тункинской системы впадин.

Систематическое изучение осадочного чехла Тункинских впадин началось в 50-е гг. с разведочных работ с глубоким бурением. Н.А. Логачевым (1958) была предложена стратиграфическая схема кайнозойских отложений впадин байкальского типа, раскрывающая этапность их эволюции. Эта схема стала классической и легла в основу всех

дальнейших исследований, дополнившись работами (Равский, 1960, 1964, 1972; Равский, Голубева, 1960, 1962; Медведев, 1968; Мазилев, 1972, 1993; Флоренсов, 1974; Кононов, Мац, 1986). Современный этап изучения осадочного заполнения впадин характеризуется, в основном, уточнением параметров седиментации, закономерностей осадконакопления и определения влияния изменения климатических условий на осадочные процессы благодаря появлению новейших методов датирования и седиментологического анализа (Кульчицкий и др., 1994; Уфимцев и др. 2003; Кривоногов, 2010; Щетников, 2001, 2012, 2013, 2019; Krivonogov, Safonova, 2017; Коломиец, 2010, 2019; Филинов, 2007; Козырев и др., 2012, 2014; Сизов, 2014; Семеней, 2015; Гладков, Лунина, 2010; Alexeev et al., 2014; Arzhannikova et al., 2020; Опекунова, 2009; Рыжов и др., 2016; Макаров и др., 2016).

Данные о характере и динамике оледенений, полученные в работах (Львов, 1930; Олюнин, 1965; Гросвальд, 1965, 1987; Gillespie et al., 2008; Arzhannikov et al., 2012, 2015) свидетельствуют о значительном влиянии ледниковых процессов на формирование рельефа в пределах Тункинской системы впадин в плейстоцене.

Вулканы Тункинского рифтового сегмента последовательно изучали с середины 1980-х гг. Большим прорывом в изучении вулканизма ТСВ стала возможность систематического применения К–Аг метода абсолютного датирования древних вулканических пород, а для позднеплейстоценовых и голоценовых вулканов методы датирования  $^{14}\text{C}$  и U–Th (Рассказов, 1993; 2000; Ivanov et al., 2015). Новый, более точный,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  метод абсолютного датирования базальтов, позволил уточнить и расширить линейку дат вулканических проявлений в Тункинских впадинах (Ivanov & Demonterova, 2009, 2010; Ivanov et al., 2015).

По первым тектонофизическим исследованиям (Булмасов, 1968; Шерман и др., 1973), проведенным на площади Тункинской впадины был сделан детальный анализ рифтогенных структур, дана генетическая характеристика, определение полей тектонических напряжений. Благодаря современным методам исследований (GPS-мониторинг), который осуществляется с 1998 г. (Sankov et al., 2014), проводится количественная оценка современных горизонтальных движений и деформаций Центральной Азии. В результате изучения деформационного режима Байкальской рифтовой системы (Larroque et al., 2001, Чипизубов и др., 2003, Parfeevets and San'kov, 2006), была зафиксирована смена деформационного режима в позднем плейстоцене с трансензионного на транспрессионный для Тункинской системы впадин. Это обстоятельство проявляется в инверсионном поднятии Мондинской, Торской и Быстринской впадин.

Палеосейсмогеологические исследования основных морфоконтролирующих разломов в Тункинской системе впадин (Мондинский, Тункинский и юго-восточное окончание Главного Саянского разлома) проводились учеными (McCalpin, Khromovskikh, 1995; Сейсмотектоника..., 1968; Чипизубов, Смекалин, 1999; Чипизубов и др., 2003; Arjannikova et al., 2004; Arzhannikova et al., 2005; Смекалин, 2008; Ritz J.-F., 2018; Arzhannikova et al., 2018). Были получены данные о сейсмическом потенциале отдельных сегментов разломов, кинематике, амплитуде и скорости смещений по ним. Сделан вывод о том, что хребет Хамар-Дабан и Тункинский бассейн поднимаются вместе, и что основными триггерами современных региональных землетрясений являются Тункинский и Мондинский разломы (Arzhannikova et al., 2020).

Оценивая, в целом, результаты геологической изученности ТСВ, мы определили слабо освещенные и дискуссионные вопросы эволюции Тункинской секции БРЗ, на которых акцентировали внимание в своем исследовании.

## **ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для Тункинского рифта основная часть публикаций касается проблем сейсмотектоники и геодинамики (Larroque et al., 2001; Arjannikova et al., 2004; San'kov et al., 2004; Arzhannikova et al., 2007; Ivanov et al., 2010; Smekalin et al., 2012; Lunina et al., 2016; Ritz et al., 2018), плейстоценовых оледенений (Arzhannikov et al., 2015) и криогенеза (Alexeev et al., 2014),

инверсии тектонического режима (Ufimtsev et al., 2009; Shchetnikov et al., 2012; Shchetnikov et al., 2016) и сейсмиков (Гладков, Лунина, 2010), четвертичных отложений (Ufimtsev et al., 2003; Shchetnikov et al., 2015; Kozyrev et al., 2014) и вулканизма (Rasskazov et al., 2013). Однако, среди работ встречается мало исследований, посвященных комплексному изучению элементов рельефа в условиях смены тектонического режима и глобального изменения климата. Системного изучения взаимосвязи кинематики сегментированного разлома и геоморфологических параметров ее ключевых маркеров не проводилось. Изучению влияния палеоземлетрясений на рельеф гольцовой зоны горного окружения ТСВ и прилегающие территории, и вкладу сейсмогравитационных и гравитационных процессов в формирование осадочного комплекса также не уделялось внимания. Остаются вопросы и при изучении осадочного комплекса ТСВ, например, нерешенной проблемой является генезис песков, широко распространенных в Тункинской и Торской впадинах. При постановке проблемы был учтен существующий круг нерешенных вопросов, для решения которых были привлечены геолого-геоморфологические и геохронологические методы. Для получения информации о рельефе нами применялся морфометрический анализ, дешифрирование данных дистанционного зондирования, структурно-геоморфологический метод. Датирование исследуемых объектов включали традиционные и современные методы: (АМС-метод ( $^{14}\text{C}$ ), метод оптико-стимулированной люминисценции (OSL)).

### ГЛАВА 3. ТЕКТНИЧЕСКАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ ТУНКИНСКОГО РАЗЛОМА (БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ) НА ОСНОВЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Динамическая эволюция рельефа тектонически активных областей является результатом сложного взаимодействия между тектоническими и эрозионными процессами. Для получения количественных данных, характеризующие это взаимодействие мы применили морфометрический анализ долгосрочных топографических маркеров (Petit et al., 2009a; Burbank, Anderson, 2011; Tsimi, Ganas, 2015; Topal et al., 2016; Cheng et al., 2018). Были оценены параметры фасет, развивающихся вдоль Тункинского разлома, и прилегающих водосборных бассейнов, дренирующих южный склон Тункинского хребта.

Источником данных для измерений послужила цифровая модель рельефа (ЦМР) TanDEM-X с разрешением 12 м. Для уточнения некоторых данных также были проведены полевые работы на отдельных участках разлома и использованы результаты  $^{10}\text{Be}$ -датирования смещенных по разлому террасовых поверхностей (Arzhannikova et al., 2018). На основании данных ЦМР, снимков Google Earth pro и топографических карт масштаба 1:100 000, вся протяженность Тункинского разлома в пределах ТСВ была разделена на сегменты согласно границам, выраженных в рельефе обновленных участков разлома и изменению простираения (рис. 2).

Были оценены морфометрические параметры 64 фасет вдоль горного фронта Тункинского хребта (рис. 3). Анализ проводился по следующему набору геоморфологических показателей: **H** – высота, **W** – ширина, **BL** – базовая длина фасеты, угол наклона фасеты. Были проведены также различные варианты корреляции этих параметров. Также использовались параметры: **S<sub>mf</sub>** (извилистость горного фронта), значение которой отражает относительный возраст и соотношение скорости

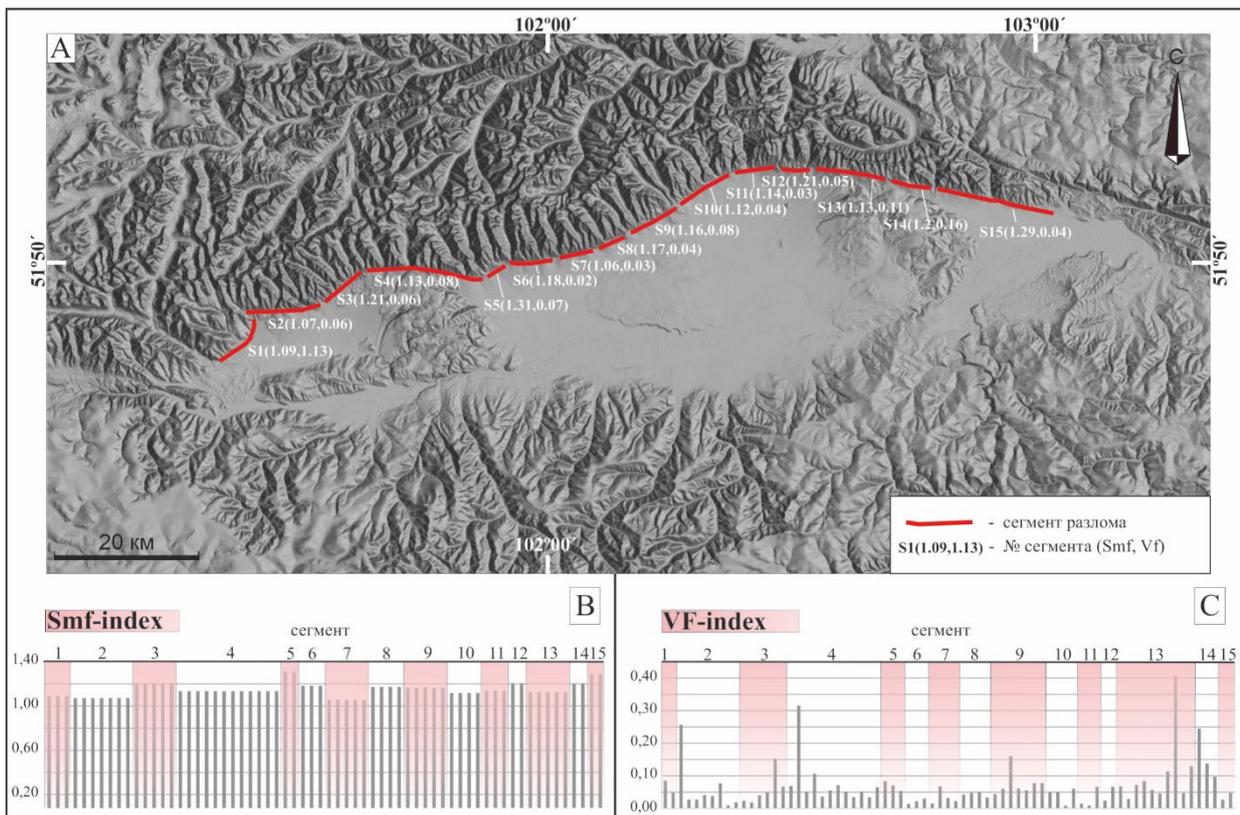


Рис. 2. Схема расположения сегментов Тункинского разлома. А - цифровая модель TanDEM-X, с сегментами Тункинского разлома и параметрами (Smf, Vf); Б - гистограмма, значений индекса Smf; В - гистограмма значений Vf.

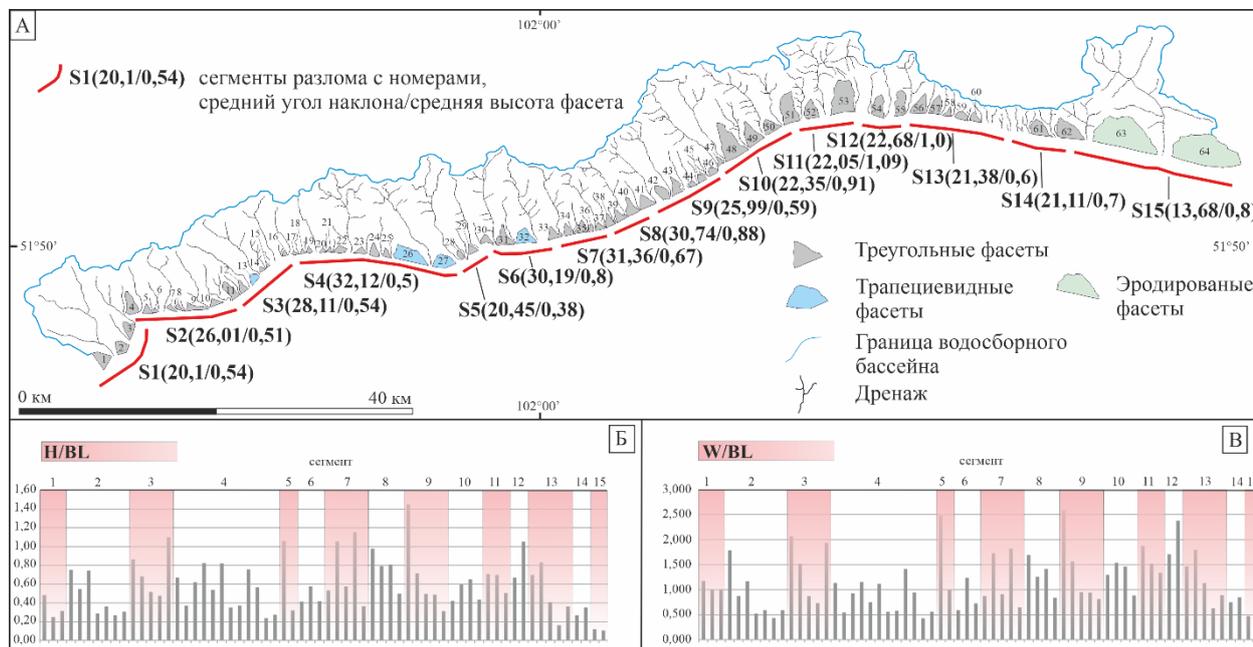


Рис. 3. Схема расположения фасет вдоль линии Тункинского разлома. А - схема, отражающая формы фасет, средний уклон и высоту фасет; Б - индекс H/BL отношения высоты фасет к базовой длине; В - индекс W/BL отношения ширины фасет к базовой длине. тектонического подъема и эрозионных процессов; **Ddf** (плотность дренажной системы фасет), показывает плотность каналов, дренирующих фасету, дает представление о возрасте фасета, а также учитывает литологический фактор; **BS** (форма водосборного бассейна), отражает зависимость формы водосборного бассейна от активности тектонических процессов; **HI** (гипсометрический интеграл), показывает соотношение эрозионных и тектонических

процессов, индикатор относительного топографического развития; **AF** (коэффициент асимметрии), отражает степень тектонической активности и показывает наличие наклона тектонического блока в пределах сегмента разлома; **VF** (форма поперечного профиля долины), характеризует уровень тектонической активности.

Для определения геоморфологического отклика водосборной системы на тектоническую активность Тункинского разлома были оценены параметры 74 водосборных бассейнов на южном склоне Тункинского хребта (рис. 4).

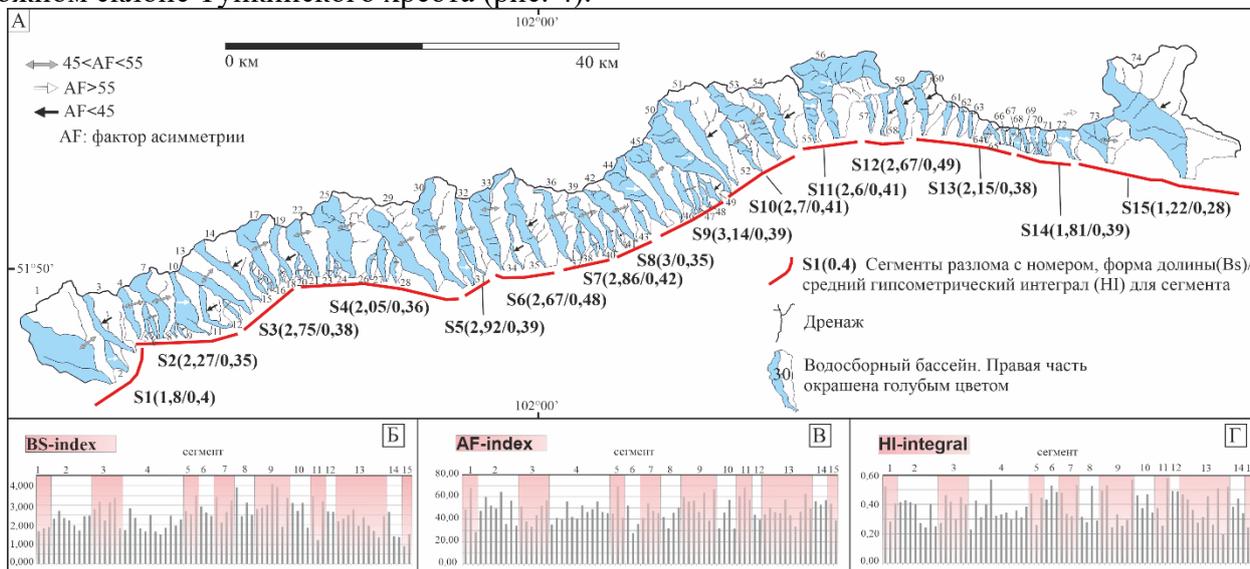


Рис. 4. А - схема водосборных бассейнов 1- 74 со средними значениями AF, Bs и HI для каждого сегмента. Гистограммы значений: Б - BS-индекса; В - AF-индекса; Г - HI-индекса.

### Долгосрочные скорости смещений

Высота и наклон фасет являются индикаторами тектонической активности и могут использоваться для оценки скорости смещения по сбросовым разломам (DePolo & Anderson, 2000; Ganas et al., 2005; Petit et al., 2009a; Tsimi & Ganas, 2015). Мы использовали соотношение между скоростью смещения по разлому и высотой фасет, предложенное в работе (Petit et al., 2009B), опробованную автором для оценки долгосрочных скоростей смещения в рифтовых впадинах северо-восточного сегмента БРЗ:

$$1. S_v = 0,0013H,$$

где  $S_v$  - скорость смещения по разлому,  $H$  - высота фасета. (Petit et al., 2009B).

Мы оценили среднюю скорость сбросового смещения для трех основных структур западной части ТСВ (с запада на восток): Хойтогорьской впадины (по сегментам 1-3), Ниловского отрога (сегмент 4) и западной части Тункинской впадины (сегменты 5-9). Полученные значения составили 0,8, 1,0 и 1,0 мм / год, соответственно.

### Возраст формирования геоморфологических структур ТСВ

Рассчитанные скорости опускания для Хойтогорьской, Тункинской впадин и Ниловского отрога, как отдельных структурных элементов Тункинского рифта были использованы для определения возраста этих структур. Используя данные мощности осадочных отложений, соответствующих этапу «быстрого рифтинга», в 1240 м, высоту Тункинского хребта в районе максимального опускания впадины, в 2000 м, и среднюю скорость опускания для Тункинской впадины, в 1,0 мм/год, мы рассчитали возраст начала кайнозойской активизации Тункинского разлома, когда Тункинский хребет и Тункинская впадина начали развиваться по системе грабен/горст. Возраст составил 3,2 млн. лет, и согласуется со стратиграфическими данными, относящими ранний этап формирования ановской свиты, маркирующей начало «быстрого рифтинга», к середине плиоцена (Мазилев

и др., 1972). Для Ниловского отрога мы получили данные из рассчитанной скорости смещения по 4-му сегменту разлома (1,0 мм в год), отделяющему Ниловский отрог от Тункинского хребта, и перепаду высот в 1500 м между вершиной Тункинского хребта и поверхностью Ниловского базальтового чехла. Проседание Ниловского отрога относительно Тункинского хребта началось 1,5 млн. лет назад. Для Хойтогорской впадины при скорости смещения 0,8 мм / год и перепаде высот в 2800 м между вершиной Тункинского хребта и основанием впадины, максимальный возраст составляет 3,5 млн лет. Минимальный возраст обособления Хойтогорской котловины ограничен временем начала погружения Ниловского отрога (1,5 млн лет).

## **Выводы**

Морфометрический анализ Тункинского горного фронта, включая оценки извилистости ( $S_{mf}$ ), формы поперечного сечения долин ( $V_f$ ) вдоль тектонического уступа и морфометрии фасет, свидетельствует о тектоническом контроле современной морфологии горного фронта и, в целом, высоком уровне тектонической активности Тункинского разлома. Установлено, что уровень тектонической активности меняется вдоль разлома.

Геоморфологический отклик водосборной системы Тункинского хребта неодинаков на разных участках Тункинского разлома. Морфометрические параметры водосборных бассейнов, такие как форма водосборного бассейна ( $B_s$ ) и гипсометрический интеграл ( $H_I$ ), указывают на тесную взаимосвязь между кинематикой сегментов разлома и характером поверхностной эрозии.

Оценка позднеплиоцен-четвертичных скоростей сброса для отдельных геоморфологических структур Тункинской системы показала, что погружение Тункинской, Хойтогорской впадины и Ниловского отрога происходит со средней скоростью 1.0, 0.8 и 1.0 мм в год соответственно. Оценка возраста этих геоморфологических структур на основе скорости предполагает, что начало их опускания по Тункинскому разлому относится к разным периодам времени. Так, погружение Тункинской впадины началось около 3,2 млн лет назад, Хойтогорской впадины - в пределах 3,5-1,5 млн лет. Самой молодой морфоструктурой западной части ТСВ является Ниловский отрог, отделившийся от Тункинского хребта 1,5 млн лет назад.

Средняя скорость смещения по разлому западной части ТСВ на уровне 0,9 мм в год (1-9 сегмент) сопоставима со скоростью вертикального смещения в позднем плейстоцене-голоцене, оцененной для Аршанской палеосейсмодислокации в Тункинской впадине, что позволяет предположить, что западные сегменты разлома не менее сейсмически опасны, чем Аршанский сегмент. Это требует проведения детальных палеосейсмологических исследований вдоль западных сегментов разлома для уточнения характеристики их сейсмического риска.

Поднятие горного фронта Тункинских Гольцов создает условия для активизации гравитационных процессов на склонах, меняя общую картину поступления денудированного материала с бортов во впадины ТС. С другой стороны, реагируя на дифференцированные тектонические движения, меняется рисунок гидрографической сети р. Иркут и ее притоков, создавая новые условия для аккумуляционных и эрозионных процессов в пределах впадин. Оценке взаимоотношения эрозионно-аккумулятивных и неотектонических процессов посвящены следующие главы исследования.

## **ГЛАВА 4. УСЛОВИЯ И ДИНАМИКА ДЕНУДАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ОБВАЛЬНО-ОПОЛЗНЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Экзогенный процесс в гольцовой зоне является одним из основных источников материала осадочного заполнения впадин внутри ТС, наряду с транзитным переносом осадков генеральным водотоком р. Иркут. Исследование направлено на получение количественной оценки экзогенных литодинамических процессов на склоновых поверхностях хребтов Тункинской системы, и их вкладу в процесс седиментообразования в ТСВ. Для решения этой

задачи, время формирования рельефа гольцовой части было разделено на три условных периода разной продолжительности, ассоциированных с разными климатическими условиями: краткосрочный (постледниковый (14 тыс. л. - современность)), среднесрочный (от 109 до 14 тыс. лет назад (от МИС 5d до МИС 2)), долгосрочный (3,5 млн л.).

Краткосрочный период – время накопления гравитационных отложений в пределах верхнего яруса рельефа, за последние 14 тысяч лет, со времени деградации оледенения. Для оценки объема эродированного материала за этот период была проведена работа по дешифрированию верхнего яруса Тункинского хребта и хребта Хамар-Дабан для идентификации обвалов и оползней. Построена карта распространения обвального-оползневого объектов и их концентрации (рис. 5).

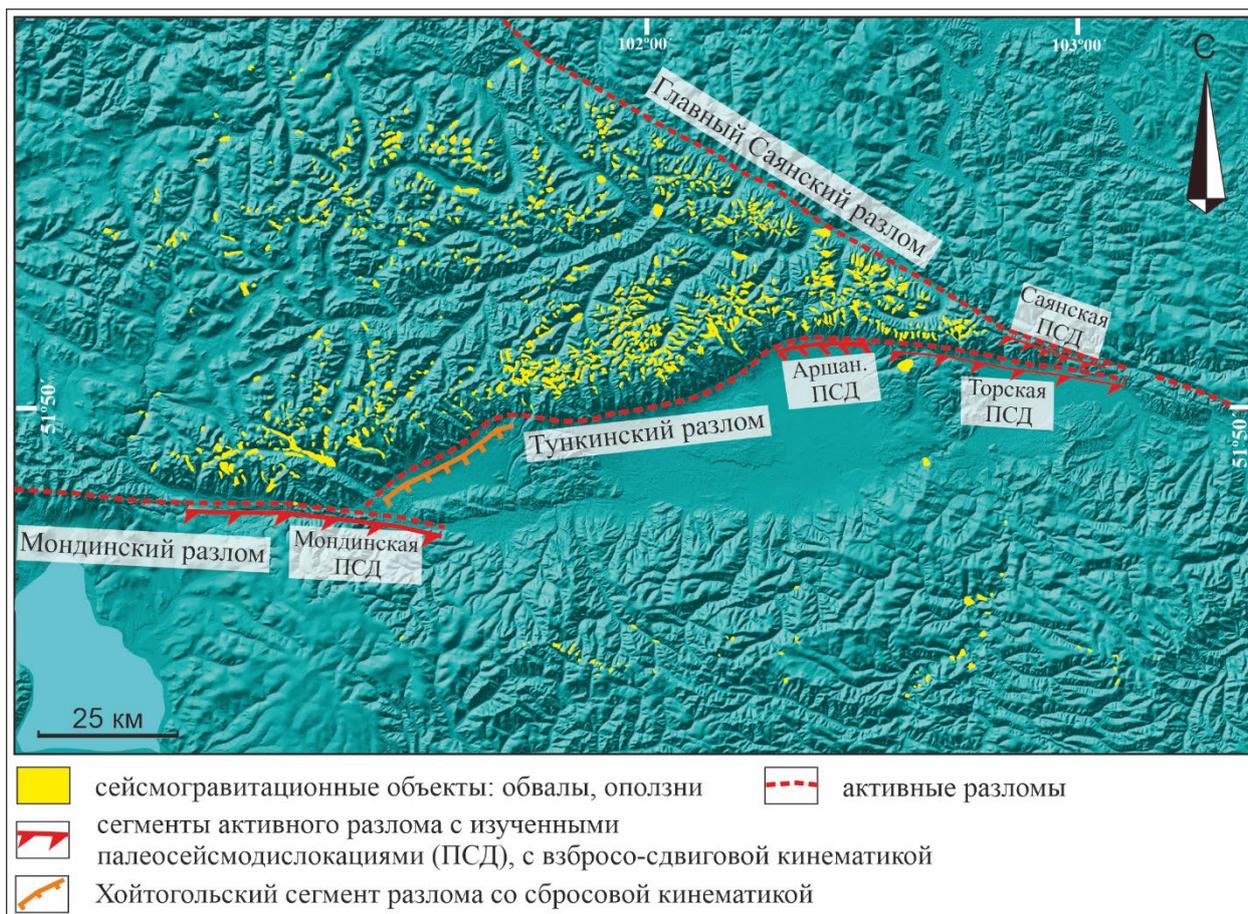


Рис. 5. Карта распределения обвального-оползневого тел в пределах Тункинской системы впадин и обрамляющих хребтов. Данные о ПСД и кинематике представлены из (Чипизубов и др., 2003; Ritz et al., 2018; Arzhannikova et al., 2018).

Среднесрочный период - весь этап позднеплейстоценового оледенения, который соотносится со стадией МИС 5d (109 тыс. л.), а его деградация с финальной стадией МИС 2 (16-14 тыс. л.). Для этого периода источником данных об объемах эрозионного сноса были отложения конечно-моренных комплексов ледников, выходящих в пределы Тункинских впадин.

Долгосрочный период - становление эрозионно-русловой сети в позднем кайнозое в результате активизации тектонических движений. Он включает два этапа, «раннерифтовый» и «новобайкальский», который является наиболее активным. Морфометрические параметры эрозионного вреза речных долин, дренирующих сформированные на «новобайкальском» этапе склоны, являются источником информации об объемах снесенного во впадины Тункинской системы материала за период 3,5 млн лет (рис. 6).

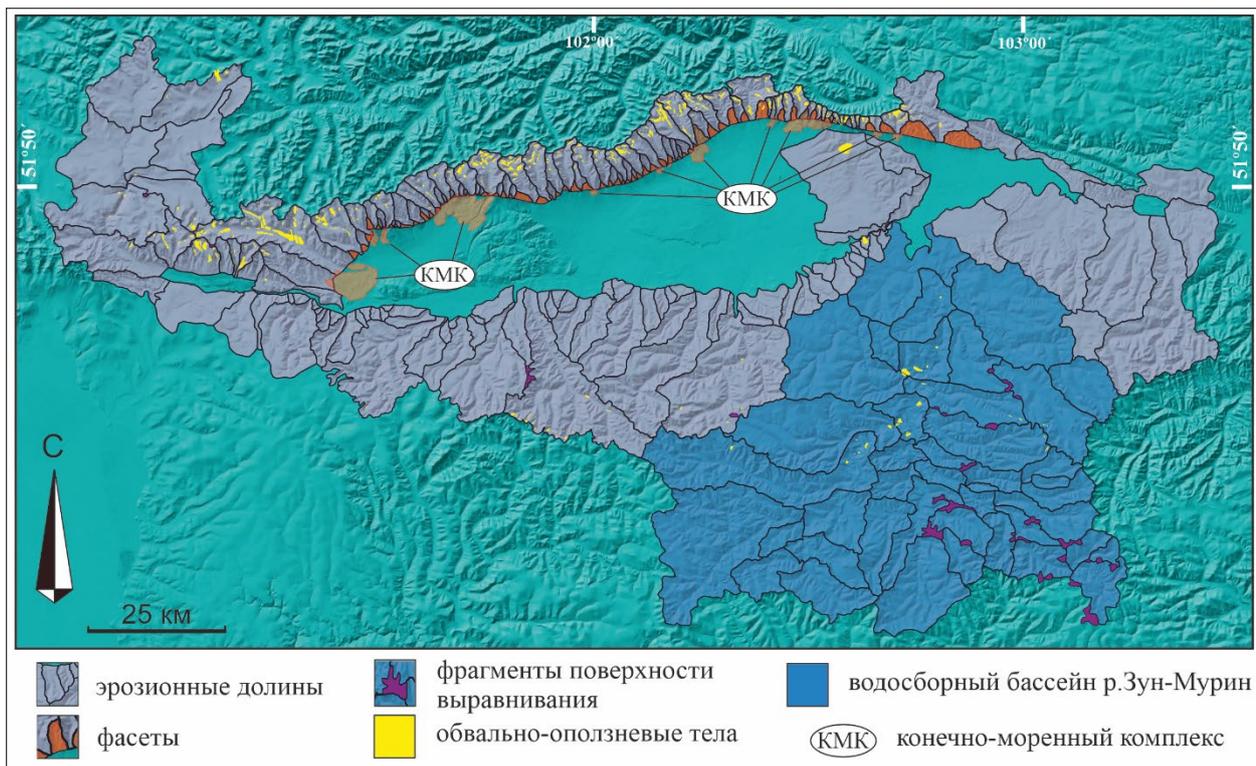


Рис. 6. Сводная карта: водосборная система, фасеты, моренные комплексы, обвальноподолзневые объекты, фрагменты поверхности выравнивания.

## **Выводы**

В результате исследования эрозионных процессов гольцовой зоны в горном обрамлении ТСВ были сделаны следующие выводы:

Особенности распространения обвальноподолзневых тел в горном обрамлении Тункинских впадин свидетельствует о тесной взаимосвязи гравитационных и сейсмогравитационных процессов с тектонической активностью разломов в позднем плейстоцене – голоцене, и кинематическими характеристиками снятия тектонических напряжений.

Расчеты объемов денудационного сноса с южного склона Тункинских Гольцов, проведенные для разных временных периодов, позволили оценить количественный вклад экзогенных процессов в формирование осадочного заполнения ТСВ за долгосрочный и краткосрочный периоды. Оценка скоростей денудационного сноса за разные периоды показала, что в течение орогенного периода (3,5 млн л.) средняя скорость денудации составляла  $56285 \text{ м}^3/\text{г}$ , за период горно-долинного оледенения (109 до 14 тыс. л. н.) скорость составляла  $26736 \text{ м}^3/\text{г}$ , за постледниковое время (от 14 тыс. л. до наших дней) скорость оценена в  $89286 \text{ м}^3/\text{г}$ .

Важным выводом является определение значительной роли землетрясений в деструкции рельефа верхнего яруса Тункинских Гольцов, происходящих в зоне активного Тункинского разлома. Таким образом, развитие рельефа горных массивов в зоне тектонического дробления, проявляется неравномерно, и имеет, очевидно, импульсный характер, а скорость денудационного сноса определяется тектонической активностью, энергией рельефа и глобальным изменением климата.

## **ГЛАВА 5. ОСАДОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТУНКИНСКОЙ СИСТЕМЫ ВПАДИН: ГЕНЕЗИС, УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ВОЗРАСТ**

Для определения условий формирования осадочного комплекса в ТСВ в позднем плейстоцене – голоцене, оценке влияния тектонического и климатического факторов на развитие рельефа поверхности котловин Тункинской системы были проведены полевые и

лабораторные исследования на территории Мондинской, Хойтогорьской, Туранской, Тункинской и Торской впадин и на поверхностях Ниловского и Еловского отрогов.

### **Мондинская, Туранская, Хойтогорьская впадины**

Исследование показало, что формирование рельефа и осадочного комплекса западной части Тункинской системы впадин (Мондинская, Туранская, Хойтогорьская) в позднечетвертичное время определяется периодическим изменением климата и сменой знака тектонических движений. В современном рельефе на западном фланге Тункинской системы впадин преобладают ледниковые формы. В гольцовой части хребтов - цирки, кары, в долинах - трюги, морены, во впадинах - все типы морен (конечные, боковые, донные) и в перигляциальной части - приледниковые равнины. Однако восходящие движения западной части Тункинской системы и позднеплейстоцен-голоценовые взбросо-сдвиговые деформации в зоне Мондинского разлома и наличие молодых сейсмогенных деформаций свидетельствует также о тектоническом влиянии на развитие рельефа, что подтверждают комплексы речных террас, врез которых обусловлен тектоническим фактором. Определена суммарная амплитуда вреза (33 м) современной речной сети в постледниковое время в долине р. Иркут, в которой впервые выделена климатическая (17 - 20 м) и тектоническая (13,5 - 16 м) составляющие.

### **Тункинская впадина**

Для Тункинской впадины, помимо общей оценки осадочного комплекса, задачей было решение дискуссионного вопроса о происхождении Бадарского массива. Это высокая аккумулятивная форма рельефа, нехарактерная для испытывающей погружение рифтовой структуры. Было проведено исследование 40-ка метрового разреза массива, OSL-датирование образцов, дополнительные исследования на склонах горного обрамления Тункинской впадины и на аккумулятивной равнине р. Иркут.

Комплексное геолого-геоморфологическое изучение песчаных массивов в Тункинской впадине позволило провести палеогеографические и геоморфологические реконструкции и определить ряд особенностей осадконакопления, где ведущую роль играли сейсмогравитационные процессы и седиментация в условиях подпрудного озера. В результате детального изучения разреза Бадарского песчаного массива получены данные об аквальных условиях седиментации. Ритмичная структура разреза отражает динамику формирования внутренней дельты в условиях слабых течений, осложненную сезонным колебанием уровня воды. Полученные 8 OSL дат для всего разреза дают временной отрезок 24-15 тыс. л., в течение которого произошло накопление основной части разреза. Формирование палеоозера в пределах Тункинской впадины связано с подпором антецедентного участка р. Иркут в Еловском отроге крупными обвалами и оползнями. В результате геоморфологических реконструкций и моделирования определены параметры водоема и подпорной гравитационной дамбы.

Анализ высот террас в долине р. Иркут с изучением разрезов и  $^{14}\text{C}$  датированием аллювиальных отложений показал отсутствие инверсионных тектонических движений в пределах Тункинской впадины в голоцене, которая, в отличие от краевых впадин Тункинской системы, продолжает прогибание. Таким образом, формирование Бадарского песчаного купола и последующий 40-90 метровый врез р. Иркут в Бадарский массив не является результатом инверсионного поднятия. Врез произошел в результате восстановления равновесия продольного профиля реки за счет изменения условий осадконакопления в постледниковое время, после спуска палеоозера ~15 тыс. лет назад.

### **Торская впадина**

Изучение новых разрезов террас в пределах Торской впадины с привлечением данных исследований (Равский, 1972; Мац и др., 2001; Уфимцев и др., 2004; Коломиец, 2010; Рыжов и др., 2016) показало, что развитие рельефа Торской впадины в позднем плейстоцене

подчинено в большей степени инверсионному тектоническому поднятию, которое проявляется на бортах впадины. На севере - это взбросо-сдвиговые подвижки по Тункинскому разлому. Южный борт Торской впадины также вовлечен в инверсионное поднятие, о чем свидетельствуют эксгумированные плиоценовые конгломераты в долине р. Зун-Мурин. Значимым фактором, влияющим на характер осадконакопления в Торской впадине, является наличие обширной водосборной сети р. Зун-Мурин, которая принесла до 40% материала, поступившего в ТСВ за весь орогенный этап. При размерах впадины 20x30 км, такой объем осадков, несомненно, оказал влияние на характер рельефа внутри котловины. Данные свидетельствуют о перегруженности впадины осадками и расширении области аккумуляции за счет перекрытия прилегающих склонов. С другой стороны, сам процесс аномально активной линейной эрозии долины р. Зун-Мурин, формирующей обширную водосборную сеть, является, очевидно, геоморфологическим откликом на тектоническое поднятие южного крыла Тункинского разлома в пределах Торской впадины, которое вовлекает в инверсию краевую часть аккумулятивного поля долины.

Таким образом, в отдельных впадинах ТС, в позднем плейстоцене – голоцене, ключевое влияние в седиментационном процессе принадлежит комбинации разных факторов. На краевых участках ТСВ баланс смещается в сторону тектонической инверсии, определяющей эрозионный характер развития рельефа, в центральной ТВ, на фоне продолжающегося погружения, формируются аккумулятивные аллювиальные и эоловые формы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа включает в себя три блока исследований, объединенных общей задачей изучения геологической истории формирования рельефа Тункинского сегмента БРЗ в позднем кайнозое, по которым предлагаются следующие результаты:

1. Определены долгосрочные скорости смещения по Тункинскому разлому для отдельных геоморфологических сегментов и возраста соответствующих им геоморфологических структур Тункинской системы. Охарактеризован геоморфологический отклик водосборной системы Тункинского хребта на тектоническую активность, что позволило понять взаимосвязь между морфометрическими параметрами и кинематикой различных сегментов Тункинского разлома. Анализ Тункинского горного фронта свидетельствует о тектоническом контроле над его морфологией. Установлено, что на морфологические особенности рельефа влияет позднеплейстоцен-голоценовая кинематическая инверсия вдоль восточной части Тункинского разлома. Скорости вертикальных смещений в позднем плиоцене - четвертичном периоде, оцененные для отдельных геоморфологических структур Тункинской системы, варьируют в диапазоне 0,8–1,0 мм / год. Средняя скорость смещений сопоставима с долгосрочными скоростями, полученными для других впадин Байкальского рифта. Определен возраст сбросового опускания Тункинской, Хойтогольской впадин и Ниловского отрога в диапазоне от 3,5 до 1,5 млн лет.
2. Количественные данные об обвалах и оползнях и особенности их распространения позволили получить представление о характере формирования рыхлых осадков верхнего яруса, вследствие тектонической активности основных разломов, контролирующей развитие ТСВ. Расчеты объемов денудационного сноса со склонов обрамляющих ТСВ хребтов, проведенные для разных временных периодов, показали количественный вклад экзогенных процессов на склонах хребтов в формирование осадочного заполнения ТСВ за долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный периоды. Скорость денудационного сноса определяется тектонической активностью и глобальным изменением климата.
3. Формирование основных элементов нижнего яруса рельефа ТСВ происходило в условиях глобального изменения климата с участием ледниковой экзарации, эоловой и эрозионной деятельности, тектонической активности Тункинского и Мондинского разломов. Представлены новые данные абсолютного датирования методами  $^{14}\text{C}$  и OSL (11 и 8 дат, соответственно) позднечетвертичных отложений. Представлена новая версия

продолжительного существования подпрудного водоема в пределах Тункинской впадины и формировании крупных песчаных толщ внутренней дельты. Определены количественные параметры климатической и тектонической составляющих в формировании рельефа впадин Тункинской системы на всем ее протяжении. Исследование подтверждает наличие инверсионных проявлений в дистальных сегментах ТСВ (Мондинской, Быстринской, Торской), однако следы инверсии в продолжающейся погружающейся Тункинской впадине не зафиксированы. Таким образом, формирование рельефа в позднем плейстоцене – голоцене ТСВ происходило в сложных условиях изменения тектонического режима рифтовой структуры и климатических процессов, влияние которых проявляется по отдельным впадинам дифференцировано.

Данная работа является этапом исследований, намеченных нами в рамках изучения эволюции рельефа юго-западного сегмента Байкальской рифтовой зоны. Методы, часть которых была использована нами для изучения ТСВ впервые (морфометрический, количественной оценки объемов эрозии и сейсмогравитационных процессов), могут быть применены для исследования геологических структур с проявленными в рельефе процессами, характерными для рифтовых впадин и других зон активной тектоники.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Публикации в рецензируемых журналах*

1. Arzhannikova A., Ritz J-F., Larroque C., Antoine P., Arzhannikov S., Chebotarev A, St'ephan J-F., M. Massault, Michelot J-L.

Cryoturbation versus tectonic deformation along the southern edge of the Tunka Basin (Baikal Rift System), Siberia: New insights from an integrated morphotectonic and stratigraphic study// Journal of Asian Earth Sciences, 2020, Vol. 204. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104569>

2. 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 810 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228864>

3. Arzhannikova A., Arzhannikov S., Ritz J.-F., Chebotarev A., Yakhnenko A.

Earthquake geology of the Mondy fault (SW Baikal Rift, Siberia) // Journal of Asian Earth Sciences, 2023, Vol.248. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105614>

*Подготовлена для публикации статья:*

4. Chebotarev A., Arzhannikov S., Arzhannikova A., Kurbanov R. Late Pleistocene sedimentation in the South of the Baikal Rift Zone (Eastern Siberia): On the issue of the genesis of the Badar Sand Field and the inversion of tectonic movements in the Tunka Depression. *Under review*

### *Материалы и тезисы докладов научных конференций*

1. А.А.Чеботарев, С.Г.Аржанников, А.В.Аржанникова. Первые результаты дистанционного зондирования обвально-оползневых структур горного обрамления Тункинской впадины // XIII Российско-монгольская международная конференция по астрономии и геофизике «солнечно-земные связи и геодинамика байкало-монгольского региона» (Институт астрономии и геофизики АН Монголии, 2019);

2. Чеботарев А.А. Площадное распространение обвалов как индикатор вероятных очагов сильных палеоземлетрясений в обрамлении тункинской впадины // XXIV Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 75-летию Победы в Великой Отечественной войне (Томск, 2020);

3. Чеботарев А.А., Аржанникова А.В., Аржанников С.Г. Установление взаимосвязи между долгосрочными скоростями смещения по сегментам тункинского разлома и морфометрическими параметрами приразломной зоны // «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященное памяти профессора С.И. Шермана 26 – 30 апреля 2021 г.Иркутск;

4. Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Чеботарев А.А., Ritz J.-F. Палеосейсмогенные деформации в зоне мондинского разлома (Тункинская система впадин, байкальский рифт) // «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященное памяти профессора С.И. Шермана 26 – 30 апреля 2021 г.Иркутск

5. Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Чеботарев А.А., Номин-Эрдэнэ Э. Палеосейсмогенная активизация Северо-Дархатского разлома (юго-западный фланг Байкальского рифта, Монголия) / Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: тезисы докладов XIV Российско-монгольской международной конференции. РАН, Сиб. Отд-ние, Институт земной коры, Институт солнечно-земной физики. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2023. С.11.