РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИРКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ

АКАДЕМИЯ НАУК МОНГОЛИИ ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ И ГЕОФИЗИКИ

ОПАСНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ МОНГОЛИИ

Ответственный редактор чл.-корр. РАН Д. П. Гладкочуб



УДК 26.21(5Мо) ББК 550.343.6(517.3) О-60

Утверждено к печати Ученым советом Института земной коры СО РАН

Издание осуществлено при финансовой поддержке интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей (0341-2015-0001)».

Рецензенты:

д-р геол.-минерал. наук А. М. Мазукабзов д-р геол.-минерал. наук Р. М. Семёнов канд. геол.-минерал. наук А. В. Черемных

Авторский коллектив:

Семинский К. Ж., Леви К. Г., Джурик В. И., Козырева Е. А., Саньков В. А., Турутанов Е. Х., Дэмбэрэл С., Арвисбаатар Н., Ашурков С. В., Батсайхан Ц., Баяр Г., Бобров А. А., Брыжак Е. В.,Бурзунова Ю. П., Буянтогтох Б., Воронин В. И., Ганзориг Д., Горбунова Е. А., Демьянович В. М., Ескин А. Ю., Имаев В. С., Ключевский А. В., Кобелев М. М., Кобелева Е. А., Кожевников В. М., Левина Е. А., Лухнев А. В., Лухнева О. Ф., Мельникова В. И., Мирошниченко А. И., Монгонсурэн Д., Мордвинова В. В., Парфеевец А. В., Радзиминович Н. А., Ружич В. В., Рыбченко А. А., Саньков А. В., Серебренников С. П., Середкина А. И., Смекалин О. П., Соловей О. А., Улзийбат М., Хритова М. А., Чипизубов А. В., Шерман С. И., Эрдэнэзул Д.

O-60

Опасные геологические процессы и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Центральной Монголии / отв. ред.: Д. П. Гладкочуб; Иркут. науч. центр СО РАН; Ин-т земной коры СО РАН. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2017. – 332 с.

ISBN 978-5-9624-1540-6

В книге представлены научные результаты, полученные в течение нескольких последних лет для Центральной Монголии российскими и монгольскими специалистами в ходе исследований сейсмотектонических и инженерно-геологических процессов с акцентом на характеристике их опасности для территории Улаанбаатарской агломерации. Рассмотрены особенности глубинного строения Монголии, результаты комплексного изучения активных разломов в ее центральной части, сейсмогеологические данные по крупным сейсмоструктурам в окрестностях Улаанбаатара, опыт районирования сейсмической опасности на территории монгольской столицы и других промышленных центров страны, а также инженерно-геологические материалы о проявлении опасных экзогенных процессов в пределах Улаанбаатарской агломерации.

Книга будет полезна для специалистов в области современной геодинамики, геофизики, инженерной геологии и геоэкологии, занимающихся общими проблемами динамики опасных эндо- и экзогенных процессов в Байкало-Монгольском регионе, а также конкретными вопросами прогноза и районирования сейсмической, радоновой и других опасностей на территориях городов и промышленных объектов Центральной Монголии.

> УДК 26.21(5Мо) ББК 550.343.6(517.3)

© Иркутский научный центр СО РАН, 2017 © Институт земной коры СО РАН, 2017

ISBN 978-5-9624-1540-6

Предисловие
Введение (К. Ж. Семинский, С. Дэмбэрэл)15
Глава 1. Глубинное строение и сейсмичность Монголии по комплексу геофизических данных
 1.1. Глубинное строение и анизотропные свойства верхней мантии Монголии по данным о дисперсии волн Рэлея и Лява (А. И. Середкина, В. М. Кожевников, О. А. Соловей) 1.2. Скоростное строение и азимутальная анизотропия земной коры и верхней мантии Монголии по данным объемных волн (В. В. Мордвинова,
 М. Улзийбат, М. М. Кобелев, М. А. Хритова, Е. А. Кобелева, Ц. Батсайхан)
деформированное состояние земнои коры Центральнои Монголии (<i>H. A. Радзиминович, Г. Баяр, М. Улзийбат, Д. Ганзориг, С. Дэмбэрэл</i>)
 А. И. Середкина)
Глава 2. Разломы Центральной Монголии и их активность на современном этапе тектогенеза по геолого-структурным, эманационным, сейсмологическим и GPS-геодезическим данным
2.1. Современные движения земной коры Монголии по данным GPS-геодезии (А. В. Лухнев, А. И. Мирошниченко, В. А. Саньков, С. В. Ашурков, С. Дэмбэрэл, Д. Эрдэнэзул)
2.2. Активные разломы и позднекайнозойское напряженное состояние земной коры центральной части Монголии (В. А. Саньков, А. В. Парфеевец, А. И. Мирошниченко, А. В. Саньков)
 2.2.1. Характеристика района, задачи и методы исследования активных разломов
Хэнтэйской тектонической седловины
 2.2.4. Активные разломы и поле тектонических напряжений поднятия Бурэн-Нуруу и Селенгинской депрессии

2.2.5. Основные закономерности формирования активных разломов и напряженного состояния земной коры Центральной Монголии	122
2.3. Оценка современной активности разломов Центральной Монго- лии на основе тектонофизического анализа эманационных, сейсмологиче- ских и геолого-структурных данных (К. Ж. Семинский, С. Дэмбэрэл, А. А. Бобров, Ю. П. Бурзунова, Д. Монгонсурэн, М. Улзийбат, Д. Ганзориг)	130
 2.3.1. Методические основы исследования характера проявления разломных зон в поле тектонической трещиноватости, газовых эманаций и эпицентров землетрясений 2.3.2. Общая характеристика прираздомных зиомадий полвециого ра- 	132
 2.3.2. Общая характеристика приразложных апомалия по вешного ра дона и факторы, определяющие газовые эманации в Централь- ной Монголии 2.3.3. Характер современной активности некоторых крупных разлом- 	139
ных зон Центральной Монголии на основе комплексного анали- за эманационных, сейсмологических и геолого-структурных данных	144
2.4. Тектонофизический подход к оценке сейсмической активности и энергетического потенциала разломов Монголии (С. И. Шерман, Е. А. Горбунова)	171
2.5. Новый подход к изучению сейсмогеологических процессов в раз- ломах при исследовании сильных землетрясений в Байкало-Монгольском регионе (В. В. Ружсич, Е. А. Левина)	178
Глава 3. Сейсмический потенциал активных тектонических структур Центральной Монголии по результатам палеосейсмических и инженерно-сейсмологических исследований	190
3.1. Параметры очаговых зон разрывообразующих землетрясений на территории центральных аймаков (А. В. Чипизубов, О. П. Смекалин, В. С. Имаев, С. Дэмбэрэл)	190
3.1.1. Краткие сведения о сейсмотектонике территории3.1.2. Методика сейсмогеологических исследований	191 193

СТРУИТУР ПЕНТРА ШИОЙ МОНЕОНИИ ПО РЕЗУЛИТАТАМ НА ПЕОСЕЙСМИНЕСКИХ	
И ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	190
3.1. Параметры очаговых зон разрывообразующих землетрясений на территории центральных аймаков (А. В. Чипизубов, О. П. Смекалин, В. С. Имаев, С. Дэмбэрэл)	190
3.1.1. Краткие сведения о сейсмотектонике территории	191
3.1.2. Методика сейсмогеологических исследований	193
3.1.3. Хустайская палеосейсмогенная структура	195
3.1.4. Керуленская палеосейсмогенная структура	204
3.1.5. Гунжинская палеосейсмогенная структура	221
3.2. Опыт и методика районирования сейсмической опасности терри- торий строительства городов и промышленных объектов Центральной Монголии (В. И. Джурик, Ц. Батсайхан, С. П. Серебренников, А. Ю. Ескин, Е. В. Брыжак)	230
3.2.1. Районирование сейсмической опасности территории	
г. Улаанбаатара и его окрестностей	231
3.2.2. Районирование сейсмической опасности территории г. Эрдэнэта	248
3.2.3. Технология построения карты сейсмического микрорайониро-	
вания территории г. Эрдэнэта и краткая характеристика выде-	
ленных зон	263

Разломы Центральной Монголии и их активность на современном этапе тектогенеза по геолого-структурным, эманационным, сейсмологическим и GPS-геодезическим данным

Глава посвящена комплексному исследованию разломов Центральной Монголии с акцентом на окрестности Улаанбаатара, поскольку именно эти тектонические структуры в плане активизации природных опасностей являются их прямым (сейсмичность) или косвенным (экзогенные процессы) источником. Описанию результатов изучения разломной тектоники предшествует раздел, в котором по данным GPS-геодезии представлены основные закономерности современных движений земной коры Монголии, реализующихся, в частности, посредством перемещений по сети разломных структур. Во втором разделе рассмотрены результаты изучения активных разломов геолого-структурными методами, позволившие для территории Центральной Монголии реконструировать позднекайнозойские поля напряжений, определить их взаимоотношения с современным напряженным состоянием, охарактеризовать источники тектонических сил и установить структурную выраженность в пределах изученного региона западной границы Амурской тектонической плиты. В третьем разделе главы представлена оценка современной активности разломов Центральной Монголии на основе тектонофизического анализа геолого-структурных, эманационных и сейсмологических данных. Завершают главу два раздела, в рамках которых предложены новые способы исследования сейсмогеологических процессов и оценки сейсмической опасности разломов в Байкало-Монгольском регионе.

2.1. Современные движения земной коры Монголии по данным GPS-геодезии

При решении фундаментальных проблем современной геодинамики регионов и исследовании деформационных процессов широко используются материалы GPS-геодезии, позволяющие определить относительные скорости устойчивого движения жестких блоков земной коры. В практическом плане материалы GPSгеодезии привлекаются для оценки экологических, социальных и экономических рисков развития крупных городов и районов техногенного освоения территорий с интенсивной добычей полезных ископаемых, там, где необходимо иметь информацию о величинах и типах современных тектонических деформаций земной коры и се поверхности. Мониторинг деформаций земной поверхности с использованием спутниковой геодезии является одним из наиболее эффективных методов 94-

2.2. Активные разломы и позднекайнозойское напряженное состояние земной коры центральной части Монголии

2.2.1. Характеристика района, задачи и методы исследования активных разломов

Закономерности распространения и кинематики активных разломов и напряженное состояние земной коры на территории Монголии исследовано крайне неравномерно. Основное внимание исследователей было уделено зонам проявления катастрофических землетрясений – Болнайского (1905 г., М = 8,4), Гоби-Алтайского (1957 г., M = 8,1) и Могодского (1967 г., M = 7,0), а в последнее время – району, прилегающему к г. Улаанбаатару, в связи с необходимостью дополнительного изучения уровня сейсмической опасности территории городской агломерации. Среди работ, посвященных активным разломам Монголии, их кинематике и скоростям смещений, следует отметить [Землетрясения и основы ..., 1985; Трифонов, Макаров, 1988; Field examples of strike-slip..., 1999; Cunningham, 2001, 2013; Late Pleistocene to ..., 2003, Reinterpretation of the active ..., 2007, Active tectonics of ..., 2008; Смекалин, Имаев, Чипизубов, 2013; Earth-guake geology ..., 2015 и др.]. Вместе с этим данных по напряженному состоянию земной коры, в особенности по позднекайнозойскому палеонапряженному состоянию, этой территории немного. Первые единичные реконструкции С. В. Ласточкина были опубликованы в работе [Землетрясения и основы ..., 1985]. Позднее нами опубликованы данные по полям напряжений Монгольского и Гобийского Алтая, Тувы, Хангая, зоны Северо-Хангайского разлома [Саньков, Парфеевец, 2005; Парфеевец, Саньков, 2010; Complex geophysical and ..., 2004; Parfeevets, Sankov, 2012], Прихубсугулья [Позднекайнозойское напряженное состояние ..., 2004]. Главные закономерности современного поля напряжений на основе данных о механизмах очагов землетрясений для отдельных частей Монголии показаны в [Современная геодинамика ..., 2002; Количественная оценка современных ..., 2005; Гольдин, Кучай, 2007; Present-day stress field ..., 1996; Complex geophysical and ..., 2004 и др.]. Для всей территории Байкало-Монгольской подвижной области и прилегающих областей обобщенная схема современного напряженного состояния представлена в работе [Позднекайнозойская геодинамика..., 2011]. Схемы, выполненные с использованием других способов расчетов современного напряженного состояния по сейсмологическим данным, опубликованные позднее [Focal mechanisms of ..., 2016; Reviewing the active ..., 2015; Seismicity and S-wave ..., 2016], существенно не отличаются от нашей схемы ни по типам напряженного состояния, ни по ориентировкам осей главных нормальных напряжений. Организация и проведение измерений методом GPS геодезии позволили получить количественные данные о скоростях современных горизонтальных движений и деформаций [GPS measurements of crustal ..., 2003; Вращения и деформации ..., 2010]. Сопоставление данных о современном напряженнодеформированном состоянии, полученных разными методами, позволило найти соответствие между пространственными и генетическими характеристиками современных напряжений и деформаций земной коры Позднекайнозойская геодинамика ..., 2011].

При оценке палеонапряженного состояния земной коры и выявлении закономерностей его эволюции важным вопросом является выделение стадийности развития территории по комплексу геолого-структурных, тектонических, формационных, геоморфологических и прочих признаков, а также датирование этих сталий. В своем современном виде тектоническая структура территории Монголии была окончательно сформирована в позднем кайнозое. Начало неотектонической активизации датируется олигоценом [Николаева, Шувалов, 1969; Мезозойская..., 1975] или концом олигоцена – началом миоцена [Девяткин, 1981; Новейшая тектоника ..., 2000]. Однако основная фаза горообразования при ускорении неотектонических движений приходится на поздний плиоцен – плейстоцен [De Grave, Buslov, Van Den Haute, 2007; Mongolian summits: an uplifted ..., 2007]. Процессы этой фазы активизации связаны с конвергенцией Индостана и Евразии и наиболее контрастно были проявлены в районах Монгольского и Гобийского Алтая. Здесь происходили высокоамплитудные поднятия на фоне формирования межгорных впалин-рампов и крупных котловин (Котловины Больших Озер. Долиноозерской, Убсунурской и др.). Поднятие Хангая связывают со сводообразованием, вызванным динамическим воздействием мантийной аномалии [Deep structure and mechanical ..., 2002], наличие которой подтверждено по данным сейсмической томографии [Исследование скоростной структуры.... 2007: Mantle-driven uplift ..., 2015]. Подобная аномалия отмечается и под Хэнтэй-Даурским сводовым поднятием [Low seismic velocity ..., 2002; Mantle-driven uplift ..., 2015]. В целом позднекайнозойская тектоника Монголии представляет собой сочетание транспрессивных и сдвиговых структур, связанных с общим коллизионным северо-восточным сжатием, структур растяжения и транстенсии, обусловленных дивергентными движениями Амурской и Евразийской плит, а также сводовых поднятий Хангая и Хэнтэя, сопряженных с локальными мантийными аномалиями [Позднекайнозойская геодинамика ..., 2011].

Восточная часть Монголии характеризуется пониженными амплитудами вертикальных неотектонических движений [см., например, Леви, 2007] и, согласно представлениям [Девяткин, 1981], развивалась в кайнозое в условиях субплатформенного режима. В отличие от высокосейсмичной области западной Монголии, восточная часть Монголии обладает слабой рассеянной сейсмичностью, что наряду с низкой тектонической активностью этой территории позволило авторам работы [Зоненшайн, Савостин, 1979] отнести ее к Амурской литосферной плите (микроплите). Западная граница этой плиты при таком подходе проводилась вдоль структур Байкальской рифтовой системы на севере, а затем от южной оконечности Байкальской впадины на юг через центральную часть Монголии, между Хангайским и Хэнтэйским поднятиями на юг-юго-восток по направлению к восточному окончанию Гобийского Алтая (рис. 2.2.1, врезка). С запада выделялся так называемый Монгольский блок, ядро которого составляет Хангайское поднятие. Такую трактовку границы Амурской плиты в Центральной Монголии поддерживает большинство исследователей (см. обзор в работе [Кинематика Амурской плиты..., 2011]). Представление об этой линии раздела тектонических структур совпадает с представлением о существовании крупнейшей границы или зоны, протягивающейся примерно вдоль 105-го меридиана от оз. Байкал до Бирманских гор (см. обзор в работе [Sherman, Jin, Gorbunova, 2015]) и делящей эту часть континентальной Азии на активную центральноазиатскую и слабоактивную восточноазиатскую провинции.

Территория наших исследований располагается в центральной части Монголии в полосе между 102-м и 105-м меридианами. С юга на север здесь выделяются три района, отличающихся особенностями рельефа, преобладающим простиранием позднекайнозойских структур и уровнем сейсмической активности. Район между Хангайским и Хэнтэйским сводовыми поднятиями – Хангай-Хэнтэйская тектоническая седловина (рис. 2.2.1, 2.2.2) на юге характеризуется среднегорным рельефом, слабой врезанностью речных долин, что отвечает низким скоростям вертикальных тектонических движений. Современная сейсмическая активность здесь также невысока – зафиксировано относительно небольшое количество землетрясений с магнитудой менее 4,5 [One century of seismicity ..., 2000].



Рис. 2.2.1. Схема разломов плиоцен-четвертичной активизации центральной части Монголии. Прямоугольниками на схеме выделены районы исследований: 1 – Хангай-Хэнтэйская тектоническая седловина; 2 – Бургутский блок (Орхон-Тольское междуречье); 3 – Селенгинская депрессия и поднятие Бурэн-Нуруу. Затененная область на схеме – зона возможного положения границы Амурской плиты по [Зоненшайн, Савостин, 1979]. На врезке вверху показана территория исследований (прямоугольник) и положение западной границы Амурской литосферной плиты. Эллипсами обозначено положение Хангайского (Хг) и Хэнтэйского (Хт) сводов.

1 – плиоцен-четвертичные впадины; 2–4 – кинематика разломов: 2 – сбросы, 3 – сдвиги, 4 – взбросы и надвиги; 5 – разломы с признаками голоценовых подвижек; 6 – точки наблюдений; 7 – предполагаемые места строительства гидроэлектростанций

Рельеф Бургутского блока (Орхон-Тольское междуречье) существенно более расчлененный. Сейсмическая активность в его пределах высока – в западной части блока располагается эпицентр Могодского землетрясения 1967 г. (*M*w = 7,0) и его многочисленных афтершоков [One century of seismicity ..., 2000]. Восточная часть блока характеризуется слабой рассеянной сейсмичностью.

Рельеф блоковых поднятий, ограничивающих Приселенгинскую депрессию, также весьма расчлененный, что свидетельствует о высокой скорости вертикальных движений. В пределах массивного блока поднятия Бурэн-Нуруу прослеживаются скопления слабых землетрясений и в отдельных случаях – землетрясений с магнитудой 5. Структуры Селенгинской депрессии слабо сейсмически активны на современном этапе [One century of seismicity ..., 2000].

Позднекайнозойская разломная тектоника и поле тектонических напряжений района исследованы недостаточно. В то же время район интересен тем, что именно по эпицентральной зоне Могодского землетрясения и далее на юг по зоне сочленения Хангайского и Хэнтэйского поднятий проводится граница Амурской плиты [Зоненшайн, Савостин, 1979], геолого-структурное выражение которой на территории Монголии до настоящего времени никак не охарактеризовано. В задачи нашего исследования входят выявление активных разломов этой территории, оценка их кинематики и реконструкция палеонапряженного состояния в зонах этих разломов, что в комплексе позволит определить стиль позднекайнозойского деформирования земной коры в зоне предполагаемой межплитной границы.

Картирование разломов и исследования их кинематики проводились с применением дешифрирования космических снимков и трехмерных моделей рельефа (GTOPO-30). Полевая заверка выделенных линеаментов осуществлялась с использованием традиционных геолого-геоморфологических и геолого-структурных методов, а также сопровождалась изучением тектонической трещиноватости и микросмещений в зонах активных разломов. Для реконструкций палеонапряженного состояния были собраны данные о трещинах и локальных разломах со штрихами и бороздами скольжения, т. е. хрупких деформациях, свойственных верхним этажам земной коры и кайнозойскому этапу геологического развития территории. Расчеты стресс-тензоров тектонических палеонапряжений проведены с использованием технологии, реализованной в программном комплексе TENSOR [Delvaux, 1993] и WinTENSOR [Delvaux, 2012]. Классификационным признаком типа напряженного состояния является стресс-отношение $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, характеризующее форму эллипсоида напряжений [Paleostress reconstruction and ..., 1997].

2.2.2. Активные разломы и поле тектонических напряжений Хангай-Хэнтэйской тектонической седловины

Территориально исследования проводились в центральной части Монголии, между населенными пунктами Хархорин, Эрдэнэсант и Арвайхэр (см. рис. 2.2.1). Здесь выделяются разломы трех главных простираний – северо-западные и субмеридиональные (1), субширотные (2) и северо-восточные (3). При этом структуры северо-восточного простирания пространственно и, по-видимому, генетически тяготеют к Хангайскому поднятию.



Рис. 2.2.2. Схема разломов позднеплейстоцен-голоценовой активизации и позднекайнозойского палеонапряженного состояния района Хангай-Хэнтэйской тектонической седловины. Классификация стресс-тензоров по [Paleostress reconstruction and ..., 1997] приведена под схемой

Субширотные разломы

Зона Джаргалантгольского разлома (ДГР) прослеживается вдоль северного борта долин рек Джаргалант-Гол и Ар-Джаргалант-Гол (рис. 2.2.2, восточная часть участка 1). Общая длина разлома составляет около 25 км. Отчетливо выделяются два сегмента – западный и восточный, которые различаются по характеру выражения в рельефе и степени проявленности голоценовых деформаций. Запад-

ный сегмент разлома имеет широтное простирание и характеризуется отчетливым поднятием южного, подгорного крыла с амплитудой порядка 40–50 м. Здесь, в южном крыле разлома, базальные меловые брекчии имеют крутое залегание (азимут падения 170°∠ 55°). Судя по соотношению трассы разрыва и рассекаемых им элементов рельефа, на этом сегменте разлом имеет крутое падение на юг, а местами выполаживается, наследуя слоистость мезозойских осадков. Наряду с поднятием южного крыла отмечаются левостороннее смещение долин временных водотоков, признаки существования спущенных подпорных водоемов, верти-кальные смещения поверхностей второй и третьей террас.

Восточный сегмент разлома имеет восточно-северо-восточное простирание. Он прямолинеен в своей западной части и круто поворачивает на юг на восточном окончании. Южное крыло разлома поднято с амплитудой 1,0–1,5 м. Здесь хорошо проявлена левосторонняя сдвиговая компонента смещений по разлому, которая в зависимости от возраста маркирующего элемента рельефа варьирует от 4,7–5,0 до 80–100 м (рис. 2.2.3, *a*, *б*). В центральной части наблюдается юго-юговосточное падение зоны разлома под углом $\angle 55^\circ$, согласное с падением слоев раздробленных меловых аргиллитов и листоватых сланцев.

Реконструкция палеонапряженного состояния по данным о тектонической трещиноватости и штрихах скольжения в зоне разлома показывает, что позднекайнозойские подвижки формировались в условиях сжатия и транспрессии при субмеридиональном направлении оси главных сжимающих напряжений [Парагенез активных разломов ..., 2015, см. рис. 4].

Северо-Бурдский разлом (СБР) субширотного простирания прослеживается в верхней части борта широкой долины р. Ар-Джаргалант-Гол в виде двух параллельных кулисных уступов и продолжается в восточной части уступом и линеаментом северо-восточного простирания (рис. 2.2.1, западная часть участка 1; рис. 2.2.4). Общая длина структуры составляет 9 км. Высота основного уступа около 20 м (рис. 2.2.4, δ). На центральном сегменте разлома отмечаются левосторонние смещения долин временных водотоков. Максимальная измеренная амплитуда горизонтальных смещений составляет около 30 м. В коренном залегании разлом представлен зоной повышенной трещиноватости, дробления, какиритизации пород. В трещиноватости представлено как продольное уступу направление с пологим падением сместителей надвигов и сдвиго-надвигов, так и диагональные направления с преимущественно сдвиговыми смещениями. Реконструкции палеонапряженного состояния указывают на господство сжатия с субмеридиональным и северо-восточным направлением оси главных нормальных напряжений сжатия [Парагенез активных разломов ..., 2015, см. рис. 4].

Таким образом, зоны субширотных ДГР и СБР были активизированы в плейстоцене в условиях сжатия в субмеридиональном и северо-восточном направлении. Связанные с ними деформации наложены на склоны уже существовавшей сквозной палеодолины рек Джаргалант-Гол и Ар-Джаргалант-Гол. По кинематическому типу разломы могут быть отнесены к взбросо-сдвигам, левосторонние сдвиговые смещения по амплитуде преобладают над вертикальными взбросовыми.





Рис. 2.2.3. Левосторонние горизонтальные смещения долины временного водотока по восточному сегменту ДГР: *а* – накопленное смещение левого борта долины с амплитудой до 80 м (фото В. Санькова), положение разлома показано вертикальными стрелками; *б* – однократное смещение русла, предположительно, при последнем палеоземлетрясении с амплитудой около 5 м (фото А. Баясгалана), положение разлома показано пунктирной линией. Вид с юга



Рис. 2.2.4. Морфология уступа СБР: *a* – фрагмент космического снимка Spot (Google Earth) зоны СБР. Положение разлома показано вертикальными треугольниками; *б* – тектонический уступ в зоне разлома (вид с севера) (фото В. Санькова). Положение разлома показано вертикальными стрелками

Разломы север-северо-западного и субмеридионального простирания

Зона Ховрийнгол-Шарлийнгийнгольского разлома (ХШР) прослеживается вдоль восточного крутого склона хребта Мустийн-Цаган-Обо и выражена в рельефе уступами субмеридионального и северо-западного простираний (рис. 2.2.2, участок 2, рис. 2.2.5, *a*). На севере она продолжается двумя кулисно расположенными уступами северо-западного простирания. Неотектонические структуры наследуют древние разрывные нарушения [Geological map of Mongolia ..., 1998]. Общая длина разлома составляет 21 км. Западное крыло разлома поднято над восточным в среднем на высоту более 250 м. На субмеридиональном участке южного сегмента разлома отмечается правостороннее сдвиговое смещение борта крупной долины временного водотока с амплитудой до 22 м (рис. 2.2.5, *б*). Измерения сделаны по смещенной бровке второй террасы, а сами смещения относятся к позднему плейстоцену – голоцену. Есть также свидетельства систематических правосторонних смещений конусов выноса ранней генерации в долинах мелких водотоков с амплитудами до 40–45 м. Вертикальные разрывные деформации низких террас мелких водотоков, а также наличие крупного оползня в зоне главного сместителя являются дополнительными фактами, доказывающими наличие голоценовой активности смещений вдоль XШР.



Рис. 2.2.5. Морфология уступа ХШР: *a* – фрагмент космического снимка Spot (Google Earth) южного сегмента разлома. Положение разлома показано треугольниками; *б* – панорама уступа разлома (вид с юга). Положение разлома показано вертикальными стрелками. Для масштаба показана фигура человека (В. С.), стоящего на коренном блоке, частично перекрывающем с левого борта долину водотока. Амплитуда правостороннего горизонтального смещения второй террасы составляет около 22 м (показана треугольниками) (фото А. Парфеевец)

В коренных обнажениях разлом представлен зонами повышенной трещиноватости, часто наследующей сланцеватость древних пород, дроблением пород. Изменения направления падения сланцеватости определяют морфологию главного сместителя разлома на субмеридиональном отрезке от взбросо-сдвига до сдвига. Реконструкции позднекайнозойского поля тектонических напряжений в зоне XШР показывают, что его неотектоническая активизация происходила в условиях сжатия в ССВ–ЮЮЗ направлении. Можно отметить некоторые тенденции к различию в типе поля напряжений на различных сегментах разлома. На субмеридиональном сегменте реконструированы тензоры, соответствующие условиям сдвига и транспрессии, а на сегментах северо-западного простирания – тензоры, соответствующие условиям сжатия [Парагенез активных разломов ..., 2015, см. рис. 4].

Разломы северо-западного простирания

Тухмийнуур-Уртынгольский разлом (ТУР) северо-западного простирания отчетливо делится на два сегмента (рис. 2.2.1, участок 3; рис. 2.2.6). Северозападный сегмент, длина которого достигает 42 км, косо пересекает древнюю сквозную долину в верховьях р. Уртын-Гол. Юго-восточный сегмент разлома длиной 33 км прослеживается на северном склоне бессточной котловины оз. Тухмийн-Нуур. Как на юго-западном, так и на северо-восточном склонах сквозной долины характерной формой является валообразное поднятие и уступ.



Рис. 2.2.6. Трехмерная модель рельефа в зоне ТУР. Стрелками показано положение уступа, связанного с поднятием юго-западного крыла разлома

Угол падения разлома по замерам в коренных обнажениях варьирует от 40° на широтных сегментах до 65° на северо-западных. В зоне разлома наблюдается дробление, милонитизация пород. Хорошая выраженность разлома в рельефе определена не только собственно поднятием юго-западного висячего крыла, но и литологией этого крыла, сложенного прочными, устойчивыми к процессам денудации нижне-среднедевонскими образованиями, представленными полого падающими толщами окварцованных песчаников и алевролитов со слоями диабазов и сланцев [Geological map of Mongolia ..., 1998]. На северо-восточном борту долины наличие такого уступа обеспечило подпор долин ряда временных водотоков и формирование высокодебитных источников. Позднечетвертичная активность движений по разлому на юго-западном борту долины р. Уртын-Гол подчеркивается ярко выраженным переломом ее поперечного профиля. На этом участке под-114

нятие по разлому обусловило врезание долин крупных притоков относительно пологого склона основной долины на 20–25 м, что отражает амплитуду вертикальных смещений по разлому за поздний плейстоцен – голоцен. Заметим, что возраст основной части алллювиальных и озерных осадков долины, согласно [Geological map of Mongolia ..., 1998], оценивается как среднечетвертичный. Подъем висячего крыла разлома происходил неравномерно, что отражено в формировании комплекса террас высотой 2, 4 и 6 м над современным руслом временных водотоков, пересекающих зону разлома, и соответствующей высоты уступами в русле. Импульсный характер поднятия юго-западного блока по разлому хорошо фиксируется на его юго-восточном сегменте (северный склон Тух-мийнуурской впадины). Здесь террасированы долины, по которым стекают подпертые висячим блоком разлома водотоки. Выделяются уровни 2,5; 5,0–7,5; 10,5–12,0 м. На одном из участков зоны разлома отмечаются малоамплитудные разрывные деформации конуса выноса последней генерации в устье одного из временных водотоков, что отвечает сейсмогенной голоценовой активизации движений.

Согласно результатам изучения трещиноватости и микросмещений по разрывам в коренных обнажениях, ТУР представляет собой взброс с незначительной правосторонней горизонтальной компонентой смещений, что отвечает его морфологической выраженности в рельефе. Реконструкции соответствующего кинематике разлома поля тектонических напряжений показывают, что его неотектоническая активизация происходила в условиях сжатия в СВ–ЮЗ направлении (см. рис. 2.2.2, а также [Парагенез активных разломов ..., 2015, рис. 4]).

Зона Орхон-Сангийндалайнурского разлома (ОСР) прослеживается от северовосточного окончания Орхонского грабена до впадины оз. Сангийн-Далай-Нуур (см. рис. 2.2.2, участок 4) и еще на 50 км далее на юго-восток. На различных сегментах разлом имеет субвертикальное или относительно пологое северовосточное падение. На юго-востоке зона кулисно надстраивается падающими к юго-западу разломами и представляет собой рамповую структуру. Общая длина сложнопостроенной зоны разлома достигает 200 км.

Выделяются три сегмента разлома, различающиеся по проявлениям активизации движений на плейстоцен-голоценовом этапе. На юго-восточном сегменте активизация приурочена в основном к юго-западному ограничению рампа (рис. 2.2.7, а). Особенно ярко выраженный крутой уступ ограничивает рамп с юго-запада в районе сомона Улзийт. На его северо-западном продолжении обнаружены следы сейсмогенных подвижек по разлому. На космическом снимке, совмещенном с трехмерной моделью рельефа (рис. 2.2.7, б), отчетливо видно, что вторая терраса долины короткого временного водотока поднята по разрыву с амплитудой около 3 м. Здесь проявлено характерное для голоценовых приразломных уступов копменсационное врезание русла водотока в поднятое крыло разлома и отсутствие врезания в опущенном крыле. Асимметрия конуса выноса этого и соседних распадков позволяет предполагать наличие левосторонней сдвиговой компоненты смещений по разлому. Сейсмогенные смещения по оперяющему субширотному разрыву выявлены в южном борту котловины оз. Сангийн-Далай-Нуур. Здесь у подножия уступа в поверхности наклонной равнины – бэли прослеживается заполненная поздними осадками трещина протяженностью около 4,5 км. Поднято южное крыло разрыва, высота уступа не превышает 1 м, ширина понижения в рельефе, связанного с этим разрывом, достигает 9 м. Данные дешифрирования подтверждаются полевыми наблюдениями.



Рис. 2.2.7. Структуры зоны ОСР: *а* – космический снимок Google Earth юго-восточного сегмента зоны ОСР (разломы зоны, ограничивающие рамповую впадину, показаны треугольниками); *б* – голоценовый уступ по разрыву северо-западного простирания, смещающему молодые террасы (амплитуда вертикального смещения около 3 м, амплитуда левостороннего сдвига – около 10 м)

Хорошо выраженные горизонтальные смещения позднеплейстоценовых форм рельефа обнаружены на центральном сегменте ОСР [Парагенез активных разломов ..., 2015]. На своем северо-западном отрезке зона ОСР входит в пределы Хангайского поднятия. Здесь она сочленяется с Орхонским грабеном северовосточного простирания (см. рис. 2.2.2). Структуры грабена затухают в направлении на северо-восток к зоне ОСР. При этом долина р. Орхон-Гол испытывает изгиб по правилу правостороннего сдвига, амплитуда которого достигает 900 м. Явных признаков позднеплейстоцен-голоценовой активности в зоне сочленения структур мы не отмечаем. В коренных обнажениях зона ОСР выражена многочисленными субвертикальными разрывами с горизонтальными бороздами скольжения на поверхностях сместителей. Реконструкции напряженно-деформированного состояния по данным о тектонической трещиноватости и штрихам скольжения указывают на наличие двух типов стресс-тензоров – растяжения с ССЗ-ЮЮВ простиранием оси минимального сжатия и сдвига с ССВ-ЮЮЗ простиранием оси максимального сжатия [Парагенез активных разломов ..., 2015, рис. 4]. Реконструированное простирание оси минимального сжатия для тензоров растяжения удовлетворяет направлению раскрытия Орхонского грабена. Активность растяжения для этой структуры во временном интервале от 7-6 до 0,38-0,35 млн лет назад подтверждается проявлениями вулканизма [Калиевая и калинатровая ..., 2012].

2.2.3. Активные разломы и поле тектонических напряжений Бургутского блока (Орхон-Тольское междуречье)

Кластер северо-западных и субмеридиональных разломов закартирован в междуречье рек Орхон и Тола, в окрестностях сомонов Орхон и Хишиг-Ундэр (рис. 2.2.8). Самым известным здесь и хорошо изученным объектом является Могодская сейсмодислокация, представленная сопряженными субмеридиональным правым сдвигом и взбросом северо-западного простирания, сформировавшаяся при Могодском землетрясении 1967 г., Mw = 7,0 [Землетрясения и основы ..., 1985]. К востоку от Могодской структуры располагается серия северо-западных и субмеридиональных тектонических уступов, местами пересекающих долину р. Орхон.

В районе сомона Хишиг-Ундэр, в правом борту долины рек Маньт-Гол и Тэгийн-Гол, прослеживается уступ северо-западного простирания, его длина составляет около 35 км (рис. 2.2.8, участок 1). В центральной части разлома его зона с видимой мощностью около 30 м имеет падение на северо-восток под углом 35°. Здесь на уступе зафиксированы взбросо-надвиговые деформации, а реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы сжатия и транспрессии с осью сжатия, ориентированной в северо-восточном направлении. К востоку в районе сомона Орхон прослежен разломный уступ вдоль правого борта р. Шувутын-Гол (рис. 2.2.8, участок 2). Длина уступа около 12–14 км. Простирание его в северной части – северо-западное, к югу переходящее в субмеридиональное. Высота уступа изменяется по простиранию от 2–4 до 10–12 м. Признаки правостороннего сдвигового смещения, выраженные асимметричными конусами выноса, характерны для субмеридионального участка. Деформации базальтового потока (N₂) установлены на отрезке северо-западного простирания. Базальтовый поток разорван и поднят по зоне надвига. Высота уступа на этом участке – от 2–3 до 4 м.



Рис. 2.2.8. Схема разломов позднеплейстоцен-голоценовой активизации и позднекайнозойского палеонапряженного состояния земной коры Бургутского блока. Условные обозначения на рис. 2.2.2

Разница по абсолютной высоте разорванных поверхностей другого базальтового потока в долине р. Орхон и на уступе – приблизительно 70-75 м, что, повидимому, составляет накопленную вертикальную амплитуду смещения. Реконструкции полей палеонапряжений в зоне разлома характеризуют режим сжатия в субширотном направлении на северо-западном участке и сдвиговый режим со сжатием в северо-восточном направлении на субмеридиональном (см. рис. 2.2.8). Далее к востоку прослежен тектонический уступ субмеридионального простирания вдоль правого борта р. Дзурхийн-Могойн-Гол (рис. 2.2.8, участок 2). Длина его составляет примерно 12 км. Здесь зафиксированы правосторонние смещения долин водотоков с амплитудами от 15 м до 23-25 м. Вертикальная амплитуда не определена, хотя в целом в рельефе выражено поднятие восточного крыла разлома. В одном из коренных обнажений зона разлома круто погружается на восток под углом 70°. Реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы чистого сдвига и транспрессии со сжатием в северо-восточном направлении. К юго-востоку этот разлом может быть продолжен серией уступов северо-западного и субширотного простирания вдоль дороги Орхон – Заамар, наследующих зону древнего разлома, заложенного по контакту кембрийских и триасовых пород [Geological map of Mongolia ..., 1998].

Самый восточный в кластере Баян-Ханский разлом (БХР) (рис. 2.2.8, участок 3) выражен в рельефе серией тектонических уступов, прослеженных вдоль подножия горного массива Баян-Хан-Обо в междуречье рек Орхон и Тола примерно в 40 км к северу от месторождения Заамар. Простирание уступов, кулисообразно подставляющих друг друга, главным образом северо-западное, с участками субширотного и субмеридионального. Общая протяженность составляет 63 км. Сегменты разлома северо-западного простирания полого падают на северовосток под углом 30–35°, а субмеридиональные имеют падение в восточных рум-118 бах под углом 55–65°. Высота уступов – в среднем 8,0–10,0 м, в отдельных местах по конусу выноса последней генерации – более 1,0 м. В зоне разлома наблюдаются надвиговые и левосторонние взбросо-сдвиговые смещения по северо-западным и субширотным отрезкам и правосторонние сдвиговые смещения по субмеридиональным (рис. 2.2.9). В последнем случае накопленная амплитуда сдвига долины временного водотока составила 19–20 м. Реконструкции полей палеонапряжений показывают режим транспрессии со сжатием в северо-восточном направлении.





б

Рис. 2.2.9. Морфология уступа БХР: *а* – общий вид на один из уступов северо-западного простирания к востоку от сомона Орхон, *б* – правостороннее смещение долины временного водотока по зоне разлома субмеридионального простирания (правый борт долины р. Орхон)

2.2.4. Активные разломы и поле тектонических напряжений поднятия Бурэн-Нуруу и Селенгинской депрессии

В целом поднятие Бурэн-Нуруу, ограничивающего с юга Селенгинскую депрессию, представляется относительно монолитным неотектоническим блоком. Однако в пределах его западной части выделяется зона Хануйгольского разлома (ХР) субширотного простирания, которая продолжает серию широтных разрывов междуречья рек Бугсийн-Гол и Идэр-Гол, являющуюся, в свою очередь, продолжением активизированного в историческое время участка зоны главного сместителя Северо-Хангайского разлома, именуемого Болнайским разломом [Землетрясения и основы ..., 1985] (рис. 2.2.10, участок 2). ХР прослеживается от сомона Рашаант в восточном направлении к сомону Баян-Агт и далее на восток, пересекая долину р. Хануй-Гол, продолжается в виде кулис субширотного и северо-западного простирания. Общая протяженность структуры составляет не менее 100 км.



Рис. 2.2.10. Схема разломов позднеплейстоцен-голоценовой активизации и позднекайнозойского палеонапряженного состояния земной коры поднятия Бурэн-Нуруу и Приселенгинской депрессии. *Хт* – Хутагская впадина, *С* – Селенгинская впадина. Условные обозначения на рис. 2.2.2

В районе сомона Баян-Агт разлом ярко выражен уступом запад-северозападного простирания высотой в целом 20–25 м, а в подновленной части 3–4 м (рис. 2.2.11, *a*). Уступ осложнен сейсмогенными оползнями. Сейсмогенное обновление движений по разлому проявилось также в разжижении и выдавливании грунтов (рис. 2.2.11, δ). Помимо вертикальной составляющей смещений, для разлома на этом сегменте характерны левосторонние сдвиговые смещения с амплитудами в 3 м по тальвегу ручья и в 8 м по смещению конуса выноса. Судя по соотношению трассы разлома и форм рельефа, он имеет левостороннюю взбрососдвиговую кинематику. Реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы сдвига со сжатием в северо-восточном и субширотном направлении.

На субширотном участке, пересекающем долину р. Хануй-Гол, фиксируются левосторонние взбросо-сдвиговые смещения ее бортов, бронированных базальтовым потоком (N₂). Поднято северное крыло, высота уступа в правом борту долины составляет примерно 15 м, амплитуда сдвигового смещения по правому борту долины около 20 м. Плейстоцен-голоценовые деформации фиксировались на восточном сегменте Хануйгольского разлома – левосторонние сдвиговые смещения долины временного водотока достигают 12–17 м. Деформациями затронуты осадки конуса выноса временного водотока. Выразительны также следы связанного с движениями по разлому и уже спущенного к настоящему моменту подпорного озера. Оно образовалось в результате перегораживания долины водотока порогом субширотного простирания, сформированного левосторонним взбросо-сдвигом. Поднято южное крыло – высота уступа достигает 5,0 м. Накопленная амплитуда левостороннего сдвига по смещениям долин временных водотоков варьирует от 100,0 до 135,0 м. Реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы сдвига и сжатия с осью сжатия субмеридионального и северо-восточного направлений.





Рис. 2.2.11. Поверхностные сейсмогенные деформации в зоне Хануйгольского разлома: *а* – общий вид на субширотный уступ, расположенный на окраине сомона Баян-Агт, *б* – структуры разжижения и выдавливания грунта при сейсмогенных подвижках в зоне разлома

Важно отметить, что в пределах массивного поднятия хребта Бурэн-Нуруу, которое разделяет две ветви Северо-Хангайского разлома на исследуемом его окончании, также проявлены позднеплейстоценовые и голоценовые разрывные деформации (см. рис. 2.2.10). Так, в верховьях долины р. Дзохийн-Гол, в 18 км северо-восточнее г. Эрдэнэта, на пологом склоне правого борта прослеживается уступ простирания ССВ длиной около 5 км и высотой 1,0 м, секущий конусы выноса и низкие террасы временных водотоков. Соотношение морфологии земной поверхности и трассы разрыва указывает на его крутое падение в западных румбах. Есть основания полагать, что этот сброс проявился в результате сейсмогенной подвижки по субмеридиональному разлому в голоцене.

Восточный сегмент Северо-Хангайского разлома и его северо-восточное продолжение в пределах Селенгинской депрессии (рис. 2.2.10, участок *I*) представляет собой структуру свободного изгиба (*releasing bend*) на широтном левостороннем сдвиге [Parfeevets, Sankov, 2012], которая формирует систему кулисных впадин, используемых долинами рек Селенга и Эгийн-Гол (Хутагская, Селенгинская впадины и др.) (см. рис. 2.2.1). Впадины, как правило, это полуграбены, ограничены разломами северо-восточного и субширотного простирания. К востоку эта широтная структура практически полностью преобразуется в систему полуграбенов, которая прослеживается уже в северо-восточном направлении (Селенгинская, Цаганнурская и др.). В целом восточный сегмент Северо-Хангайского разлома характеризуется обстановкой транстенсии и левосторонними сбросо-сдвиговыми смещениями. Впадины заполнены озерно-аллювиальными

плиоцен-четвертичными осадками мощностью до 100 м [Сейсмотектоника и сейсмичность ..., 1993]. На плейстоцен-голоценовую активность разломов, ограничивающих впадины, указывают деформации и смещения долин временных водотоков и конусов выноса поздних генераций. Ярким примером такого разлома является западный сегмент Хутагского разлома, вдоль которого прослежен уступ высотой 10–12 м. Кроме вертикального смещения, вдоль разлома наблюдается левосторонний сдвиг долины временного водотока с амплитудой до 20 м (рис. 2.2.12). Общая длина сегмента разлома, на котором встречены активизированные участки, составляет 18 км. Реконструкции стресс-тензоров вдоль всего восточного сегмента Северо-Хангайского разлома показывают режимы сдвига и растяжения.



Рис. 2.2.12. Морфология уступа Хутагского активного разлома: *a* – общий вид на уступ северовосточного простирания в юго-западной части Хутагской впадины (вид на север), *б* – сбросо-сдвиговое левостороннее смещение долины временного водотока в зоне разлома

2.2.5. Основные закономерности формирования активных разломов и напряженного состояния земной коры Центральной Монголии

Полученные новые данные об активных разломах Центральной Монголии позволяют оценить характер деформирования континентальной земной коры в зоне перехода от области с преобладанием горного рельефа на территории западной части Монголии к менее поднятой и активной в кайнозое субплатформенной территории Восточной Монголии, которую относят к Амурской литосферной плите [Зоненшайн, Савостин, 1979].

Унаследованность древних структурных неоднородностей

Важнейшей чертой позднекайнозойского разломообразования исследуемой территории является наследование молодыми структурами древних линейных неоднородностей. Наследуются разломы палеозойского и мезозойского тектонических этапов. Использование неоднородностей литосферы при ее хрупком деформировании происходит на разных масштабных уровнях – от сквозь литосферных разломов, таких как Северо-Хангайский, Долиноозерский, до локальных верхнекоровых структур. Крупнейшие активные разломы территории западной и Центральной Монголии без исключений следуют вдоль границ палеозойских террейнов, как это показано в работе [Badarch, Cunningham, Windley, 2002]. Локально подобная строгая унаследованность наблюдается в пределах Хангай-Хэнтэйской седловины для Джаргалантгольского, Ховрийнгол-Шарлийнгийнгольского, Орхон-Сангийндалайнурского, Северо-Бурдского разломов и в меньшей степени для Тухмийннуур-Уртынгольского разлома. Структура Тухмийннуур-Уртынгольского разлома на юго-восточном сегменте подчинена сланцеватости в нижнесреднедевонских окварцованных песчаниках, алевролитах и сланцах в оторочке тела гранитоидов позднетриасового – раннеюрского возраста. В противоположность этому, сброс северо-восточного простирания, контролирующий крутой юго-восточный борт Орхонского грабена, заложен вне зависимости от положения основных древних неоднородностей, которые здесь имеют северо-западное простирание [Geological map of Mongolia..., 1998]. Аналогичные соотношения с главными древними структурными неоднородностями имеют все крупные сбросы северо-восточного простирания, широко распространенные в пределах южного склона Хангайского свода [Cunningham, 2001; Parfeevets, Sankov, 2012]. Как правило, они протягиваются вкрест простирания главных линейных неоднородностей [Geological map of Mongolia ..., 1998].

В пределах Бургутского блока основные активные разломы наследуют раннемезозойские структуры, главным образом северо-западного и реже субмеридионального простирания [Geological map of Mongolia ..., 1998]. Они заложены согласно направлению складчатости и разломов в триасовых породах.

Широтные структуры Северо-Хангайского разлома были заложены в палеозое и определяли структурный план территории с перми до юры. На восточном окончании разлома основные структуры имеют северо-восточное направление, которое наследует юрские и меловые разрывные нарушения [Geological map of Mongolia ..., 1998].

Позднекайнозойская активизация разломов исследуемой территории носит признаки ярко выраженной селективности – далеко не в каждой зоне закартированного древнего разлома проявляются признаки деформаций рельефа земной поверхности. Южное, северное и западное ограничения Монгольского блока, которые представлены протяженными сквозь литосферными разломами – Долиноозерским, Северо-Хангайским и Кобдинским соответственно, относятся к линейно концентрированному типу структур [Сейсмогенерирующие структуры ..., 2014]. Восточная граница блока не имеет ярко выраженной единой линейной структуры. Совокупности разломов Хангай-Хэнтэйской тектонической седловины и Бургутского блока могут быть отнесены к кластерному типу структур, которые представляют собой совокупность пространственно сближенных активных разломов, имеющих схожие закономерности кинематики и расположения в поле тектонических напряжений. Возникновение таких кластеров связано с локальными объемами повышения уровня тектонических напряжений или снижения прочностных свойств в блоках земной коры, а их расположение и простирание отдельных элементов определяется локальными структурными неоднородностями. С продвижением во внутренние части Амурской плиты кластерный тип концентрации активных разломов сменяется спорадическим, который представлен достаточно случайно пространственно распределенными активными разломами [Сейсмогенерирующие структуры ..., 2014].

Возраст активных разломов

Вопрос о возрасте неотектонической активизации исследуемых разрывных деформаций дискуссионен. Его можно попытаться оценить, опираясь на возраст осадочных отложений и форм рельефа. Так, можно констатировать, что возраст речных долин региона и некоторых впадин достаточно древний – согласно геологическим данным [Землетрясения и основы ..., 1985; Geological map of Mongolia ..., 1998], многие широкие долины вмещают миоценовые и плиоценовые осадки и базальтовые потоки. В то же время миоценовые базальтовые потоки фиксируются преимущественно в долинах субмеридионального и северозападного простирания, а плиоценовые и четвертичные – в долинах субширотного, северо-восточного, а также субмеридионального простирания. Врезание долин поздней генерации связано с общим воздыманием территории и локальными поднятиями, а также, без сомнения, с изменением климата в плейстоцене.

Во многих случаях с уверенностью можно диагностировать наличие в зонах исследованных разломов разрывных деформаций всех форм четвертичного рельефа, включая голоценовые. При этом в пределах Хангай-Хэнтэйской тектонической седловины деформации часто неконформны рельефу, существовавшему в плейстоцене, а тем более раннему, плиоценовому, рельефу. То есть разрывные деформации, по крайней мере большая часть из них, здесь моложе пересекаемых ими элементов крупных долин. С определенной долей осторожности можно заключить, что начало последнего этапа активизации сдвиговых и взбросовых движений по разломам или как минимум его основная фаза относится к позднему плейстоцену.

Иная ситуация наблюдается в Орхонском грабене. Как упоминалось выше, проявления вулканизма в нем наблюдаются с конца миоцена до среднего плейстоцена [Калиевая и калинатровая ..., 2012]. На наш взгляд, справедливо принято полагать, что активизация вулканизма в зонах растяжения связана с активизацией растяжения земной коры. Движения по Орхонскому сбросу, как главной контролирующей структуре, происходили с миоцена вплоть до голоцена.

В северной части территории, в пределах Приселенгинский депресии, активизация субширотных и северо-восточных структур происходила в плиоцене – раннем плейстоцене. Здесь разрывные деформации контролируют основные формы рельефа. Активные разломы обрамляют впадины-полуграбены. Возраст заложения последних оценивается как плиоцен-четвертичный [Землетрясения и основы ..., 1985]. Активные разломы Бургутского блока, а также центральной части поднятия Бурэн-Нуруу контролируют долины субмеридионального простирания, в которых отмечаются базальты плиоценового и четвертичного возраста [Geological map of Mongolia ..., 1998].

Для соседних территорий известны оценки начала эксгумации блоков коры, связываемой с активизацией транспрессивных деформаций в пределах Гобийского Алтая [Mongolian summits: an uplifted ..., 2007]. С применением метода низкотемпературной термохронологии по апатитам установлено, что начало поднятия массива Их-Богд относится к времени 5±3 млн лет назад. Начало позднекайнозойской активизации сдвигов в обрамлении Сибирской платформы и проявления сжатия в южной части Байкальской рифтовой системы также относят к позднему плиоцену – плейстоцену [Парфеевец, Саньков, 2006; Плиоценчетвертичные деформации ..., 2011; Mats, Perepelova, 2011]. Сопоставляя эти данные с полученными выводами об активности разломов в пределах Хангай-Хэнтэйской седловины, можно заключить, что в разных частях подвижной области активизация движений по разломам могла начинаться в разное время и в пределах исследованной территории она происходила с некоторым запозданием относительно окружения.

Кинематика активных разломов

Кинематика разломов Хангай-Хэнтэйской седловины и их морфологогенетический тип связаны с их простиранием. Разломы широтного и 3C3 простирания имеют левостороннюю компоненту сдвиговых смещений при обязательном наличии взбросовой или надвиговой компоненты (Джаргалантгольский, Северо-Бурдский разломы) (рис. 2.2.13). Горизонтальная составляющая смещений, как правило, превышает вертикальную. Разломы северо-западного простирания на последнем этапе тектонической активизации (плейстоцен – голоцен) представляют собой взбросы и надвиги с левосторонней, а при отклонении к северу – правосторонней компонентой горизонтальных смещений (Тухмийннуур-Уртынгольский, Орхон-Сангийндалайнурский, Ховрийнгол-Шарлийнгийнгольский разломы). Наконец, разломы северо-восточного простирания, распространенные главным образом в пределах Хангайского поднятия, представлены сбросами (рис. 2.2.13).

Кинематика разломов Бургутского блока устанавливается достаточно определенно – здесь преобладают взбросовые движения по разломам северозападного простирания и правосторонние сдвиговые – по разломам субмеридионального простирания (см. рис. 2.2.13).

В пределах поднятия Бурэн-Нуруу максимальное развитие приобрели активные разломы субширотного и северо-восточного простирания (см. рис. 2.2.10 и 2.2.13). При этом первые характеризуются левосторонними сдвиговыми смещениями со сбросовой или взбросовой компонентой, в зависимости от их отклонения к северо-восточному или северо-западному простиранию соответственно. Гораздо реже здесь встречаются активные правосторонние субмеридиональные сдвиги и сбросо-сдвиги, которые зафиксированы нами только в восточной части поднятия вблизи г. Эрдэнэта (см. рис. 2.2.10). В пределах Приселенгинской депрессии наблюдаются сочетание и взаимные переходы субширотных и северовосточных разломов. Северо-восточные разломы представлены сбросами и левосторонними сдвиго-сбросами. С запада на восток их количество возрастает. Такое сочетание активных в одно время разломов характерно для структур свободного изгиба (*releasing bend*), формирующихся на широтном левостороннем сдвиге [Parfeevets, Sankov, 2012].

Главные сдвиговые зоны, ограничивающие так называемый Монгольский блок, в плейстоцене – голоцене, а также на современном этапе показывают левосторонние сдвиговые смещения по субширотным и ЗСЗ разломам (Долиноозерский, Северо-Хангайский) и правосторонние сдвиговые смещения – по северозападным и субмеридиональным разломам (сдвиги Монгольского Алтая, Могодский разлом) [Землетрясения и основы ..., 1985; Трифонов, Макаров, 1988; Field examples of strike-slip ..., 1999; Cunningham, 2001, 2013, Late Pleistocene to Holocene ..., 2003 и др.]. Подобные соотношения кинематики разломов разных направлений установлены для внутренней части Монгольского блока на западе Хангайского поднятия [Reinterpretation of the active ..., 2007, Active tectonics of ..., 2008].



Рис. 2.2.13. Кинематика активных разломов и результаты реконструкции позднекайнозойского поля тектонических напряжений земной коры Центральной Монголии

Левая колонка – розы-диаграммы направлений активных разломов; *средняя колонка* – реконструкция обобщенного преобладающего стресс-тензора по данным о тектонической трещиноватости; *правая колонка* – то же для обобщенного второго по распространенности стресс-тензора

Позднекайнозойское напряженное состояние земной коры

Детальная реконструкция напряженного состояния с определением его типа осуществлена с использованием данных о тектонической трещиноватости и смещениях по разрывам. С использованием всех имеющихся решений стресстензоров для последнего этапа деформаций из установленных в каждой конкретной точке наблюдений (плейстоцен – голоцен) мы оценили средний стресс-тензор поля тектонических напряжений (см. рис. 2.2.13). Для Хангай-Хэнтэйской тектонической седловины ось максимального сжатия субгоризонтальна и направлена на ССВ (аз. 20°), а ось минимального сжатия субвертикальна (см. рис. 2.2.12). По типу поле напряжений определяется как сжатие, хотя многие частные решения указывают на условия транспрессии [Парагенез активных разломов ..., 2015, см. рис. 4]. Имеющиеся немногочисленные решения стресс-тензоров по данным о тектонической трещиноватости в зонах разломов Орхонского грабена также использованы для определения среднего стресс-тензора (рис. 2.2.12). Ось растяжения (минимального сжатия) в пределах этой структуры субгоризонтальна и направлена на ССЗ (аз. 337°), а ось максимального сжатия субвертикальна.

Палеонапряженное состояние земной коры Бургутского блока (Орхон-Тольское междуречье) хорошо описывается тензорами двух типов – сжатия (см. рис. 2.2.12) и сдвига (см. рис. 2.2.12), для которых характерно субгоризонтальное залегание оси максимального сжатия, направленной на северо-восток. Совпадение положения осей главных нормальных напряжений сжатия и «переиндексация» осей σ_2 и σ_3 отчетливо показывает, что здесь ведущей осью является горизонтальное сжатие, которое на разломах северо-западного и субмеридионального простирания докайнозойского возраста заложения реализуется в надвиговых и сдвиговых смещениях соответственно, формирующих оперяющую трещиноватость.

Похожая ситуация наблюдается в пределах поднятия Бурэн-Нуруу и Приселенгинской депрессии. Здесь преобладают условия сдвига с ССВ направлением оси максимального сжатия. Вторым по распространенности является поле растяжения с СЗ направлением минимального сжатия. При этом оси минимального сжатия имеют одинаковое направление, «переиндексируются» близкие по значениям вертикально направленные оси максимального сжатия и промежуточная. По основным субширотным структурам здесь осуществляются сдвиговые смещения, а по северовосточным – сбросовые, что соответствует локальным полям напряжений.

Данные реконструкций палеонапряжений по Могодской впадине и эпицентральной зоне одноименного землетрясения 1967 г. (Mw = 7,0), приведенные в работе [Complex geophysical and ..., 2004], совпадают с вышеприведенными по среднему направлению оси максимального сжатия, однако сильнее варьируют по типам стресс-тензоров.

В целом наблюдается пространственная смена с юга на север сочетания условий преобладающего сжатия и сдвига на условия сдвига и растяжения. Кроме того, можно отметить изменение в этом же направлении простирания оси максимального сжатия от ССВ до СВ. В указанную тенденцию не укладывается поле напряжений Орхонского грабена, характеризующееся растяжением в ССЗ направлении.

Поле позднекайнозойских палеонапряжений сопредельных территорий охарактеризовано в работе [Parfeevets, Sankov, 2012]. Показано, что внутренняя, наиболее поднятая часть Восточного Хангая существенно отличается от окружа-

ющих территорий преобладанием поля напряжений растяжения с достаточно разнообразным направлением оси минимального сжатия, с преобладанием ССЗ направления этой оси. Это соответствует нашим оценкам оси направления минимального сжатия для Орхонского грабена. Напротив, кора западной части Хангая деформируется в **VCЛОВИЯХ** слвигового поля напряжений. Согласно [Reinterpretation of the active ..., 2007; Active tectonics of ..., 2008], плиоценчетвертичные разломы представлены в ее пределах главным образом левыми и правыми сдвигами. Немногочисленные реконструкции стресс-тензоров [Parfeevets, Sankov, 2012] подтверждают этот вывод. Структуры, обрамляющие Хангайское поднятие с юга (Южно-Хангайский разлом, внутренние разломы Долиноозерской впадины и др.), показывают преобладание условий сжатия и сдвига с ССВ простиранием оси максимального сжатия [Parfeevets, Sankov, 2012].

Сопоставление полученных данных с современным напряженно-деформированным состоянием земной коры

Оценка современного напряженного состояния базируется на использовании данных о механизмах очагов землетрясений. Согласно врезке к карте сейсмичности территории Монголии [One century of seismicity ..., 2000], большинство ближайших к району исследований сильных землетрясений характеризуются механизмами очагов взбросового или взбросо-сдвигового типов. Расчеты стресстензоров современного поля напряжений для Гобийского Алтая и района Могодского землетрясения 1967 г. указывают на СВ простирание оси максимального сжатия [Парфеевец, Саньков, 2010; Позднекайнозойская геодинамика ..., 2011] и тип деформаций «сжатие» и «сдвиг» соответственно. В южной части Монгольского Алтая доминируют условия транспрессии, ось максимального сжатия развернута до ССВ простирания, а в северной – до ССЗ. Эти результаты не противоречат результатам других способов расчетов стресс-тензоров. Так, в недавно вышедшей работе [Reviewing the active ..., 2015] решение стресс-тензора для региона, включающего весь Гобийский Алтай и южную половину Монгольского Алтая, показывает ССВ направление максимального сжатия (аз. 16°).

Данные о современном напряженном состоянии прилегающей с востока к району исследований территории Амурской плиты весьма скупы. Однако известно, что в механизмах очагов слабых землетрясений (M < 4,5) южной части Хэнтэйского поднятия (район г. Улаанбаатара) ось максимального сжатия при всех вариациях простирания в среднем направлена на CB (устное сообщение Д. Ганзориг и А. Батцэцэг, 2014 г.). В очагах преобладают сдвиговые и взбросовые подвижки по разрывам.

Согласно результатам измерений методом GPS-геодезии [Вращения и деформации ..., 2010], территория, включающая восточную часть восточного Хангая и Хангай-Хэнтэйскую тектоническую седловину, испытывает слабые горизонтальные деформации на уровне $10^{-9}-10^{-8}$ год⁻¹ с субмеридиональным направлением оси удлинения и субширотным – оси укорочения. Такого же уровня деформации наблюдаются для западной части восточного Хангая – с тем отличием, что по обеим осям происходит удлинение ячейки геодезической сети. Полоса между Хангаем и Гобийским Алтаем деформируется в условиях преобладания сжатия в северо-восточном направлении. Расчеты стресс-тензоров для этой территории, приведенные в настоящей работе (разд. 1.4.), полностью подтверждают это утверждение.

Источники тектонических сил

Из анализа полученных и опубликованных данных о напряженнодеформированном состоянии территории Центральной Монголии не остается сомнения в том, что активизация разломов на плейстоцен-голоценовом этапе, а также современная сейсмичность контролируются главным образом условиями дополнительного горизонтального сжатия в северо-восточном направлении, связанного с процессом конвергенции Индостана и Евразии [Molnar, Tapponnier, 1975]. В зависимости от простирания главных литосферных неоднородностей эти тектонические усилия реализуются в деформациях сдвига или сжатия. При этом поле напряжений Хангайского свода отличается и по своему типу, и по пространственным характеристикам от поля конвергентного сжатия. Как полагают авторы [Парфеевец, Саньков, 2010; Parfeevets, Sankov, 2012], растяжение, локализованное в пределах Восточного Хангая, обязано своим происхождением динамическому воздействию на литосферу разуплотненного мантийного вещества [Deep structure and mechanical ..., 2002], которое, как показали сейсмотомографические исследования [Исследование скоростной структуры ..., 2007] и результаты инверсии сейсмологических и гравиметрических данных [Asthenospheric imprints on ..., 2008], располагается непосредственно под корой.

Однако модель одноосного сжатия и экструзии блоков на восток под его действием не может в полной мере объяснить существующую картину современных горизонтальных движений на территории Байкало-Монгольского региона [GPS measurements of crustal ..., 2003]. Дополнительным фактором, позволяющим реализоваться сдвиговым деформациям в земной коре Центральной Монголии, объясняющим дивергентные движения в Байкальском рифте и ЮВ движение Амурской плиты, является воздействие на подошву литосферы астеносферного потока, направленного в юго-восточном направлении [Позднекайнозойская геодинамика ..., 2011].

Структурная выраженность и напряженное состояние в зоне влияния восточной границы Амурской плиты

Как показали результаты наших исследований и анализ данных по разломной тектонике центральной части территории Монголии, граница между Амурской плитой и Монгольским блоком (по [Зоненшайн, Савостин, 1979] в тектонической структуре выражена фрагментарно и представляет собой краевую часть зоны активных деформаций, включающей Монгольский блок и прилегающие к нему поднятия Монгольского Алтая, Тувинского нагорья, Прихубсугулья и Восточного Саяна. В пределах этой зоны существуют участки с разной скоростью деформаций, а также относительно устойчивые блоки. На территории Монголии к последним на современном этапе можно отнести блок Убсунурской впадины. Пониженные скорости современных горизонтальных деформаций характерны для Восточного Хангая. Вполне закономерно высокие скорости деформаций и движений по разломам связаны с границами блоков. В этом смысле некоторым исключением выглядит район, пограничный между Монгольским блоком и Амурской плитой. Согласно реконструкциям палео- и современного напряженного состояния, вдоль границы на плейстоцен-голоценовом этапе реализуются деформации сжатия и сдвига. В разрезе периода времени порядка десятков тысяч лет активность движений по позднекайнозойским разломам здесь проявлена практически вдоль всех отдельных фрагментов границы. Оценочно, скорости горизонтальных движений по сдвигам за поздний плейстоцен могут достигать первых миллиметров в год. Соотнося эти выводы с современным уровнем сейсмичности района, который на его юге весьма невысок, можно предположить, что активизация движений по отдельным фрагментам границы блоков происходила неравномерно не только в пространстве, но и во времени.

Исследования, представленные в разд. 2.1 и 2.2, проводились при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00826).

2.3. Оценка современной активности разломов Центральной Монголии на основе тектонофизического анализа эманационных, сейсмологических и геолого-структурных данных

Одной из наиболее важных в практическом отношении характеристик разломов является их активность на современном этапе тектогенеза. Для Центральной Монголии оценка этой активности имеет особое значение, так как здесь, содной стороны, происходили сильнейшие землетрясения (например, Могодекое с-*Мw* = 7,1; 05.01.1967 г.), а с другой — активно развиваются города, в том числе-Улаанбаатар, где проживает более одной трети населения страны.

Современная активность разломов изучается на базе сейсмологических, геодезических, эманационных, деформометрических и других исследований, результаты которых в большей или меньшей степени рассматриваются в гл. 2 для различных объектов Центральной Монголии. В данном разделе сделан акцент на эманационных, геолого-структурных и отчаети сейсмологических материалах, которые анализируются в комплексе на базе тектонофизических представлений о разломе земной коры. В сравнении с традиционными взглядами в рамках тектонофизики разлом трактустся более широко и представляет зону, включающую не только тектониты главного еместителя, но и существенно большие по размерам объемы горных пород, в которых имеют место генетически связанные с его формированием пластические и разрывные деформации [Шерман, Борняков, Буддо, 1983; Семинский, 2003].

Развитие разломных зон в верхней части коры даже в условиях постоянного тектонического режима характеризуется изначальной пространственновременной неравномерностью [Семинский, 2003]. Полный цикл разломообразования (кроме начальных этапов с эффектами упругости и пластичности) включает три дизьюнктивные стадии, сменяющие друг друга в процессе локализации деформации скалывания. На ранней дизьюнктивной стадии возникает широкая зона сравнительно мелких разрывов, которую в геологической практике обычно называют зоной трещиноватости, зоной скрытого разлома и пр. На поздней дизьюнктивной стадии разлом выражен значительно меньшей по размерам зоной распространения активных разрывов в виде небольших фрагментов магистрального сместителя, между которыми расположены интенсивно нарушенные области их взаимодействия. Разлом стадии полного разрушения представлен единым магистральным сместителем и крупными разломами оперения с тектонитами «рыхло-

Научное издание

ОПАСНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ МОНГОЛИИ

Семинский Константин Жанович Леви Кирилл Георгиевич Джурик Василий Ионович и др.

ISBN 978-5-9624-1540-6

Редактор В. В. Попова Дизайн обложки: П. О. Ершов

На обложке использована иллюстрация «Сейсмогенный разрыв, образовавшийся при Гоби-Алтайском землетрясении 1957 г." (фото В. В. Ружича)

> Подписано в печать 15.12.2017. Формат 60×90 1/16 Усл. печ. л. 20,7. Тираж 300 экз. Заказ 1268

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 124