УДК 551.243+550.34

РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЗЕМНОЙ КОРЕ УЛААНБААТАРСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА (МОНГОЛИЯ): РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДОНОВОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

¹Семинский К.Ж., ²Дэмбэрэл С., ¹Бобров А.А., ²Мунгунсурен Д.

¹*Институт земной коры СО РАН, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: seminsky@crust.irk.ru*

²*Исследовательский Центр по Астрономии и Геофизике МАН, Монголия, Улаанбаатар, Баянзүрх дүүрэг, Маахуур толгой, 5-р хороо, ШУА-ийн 7-р байр, e-mail: emberel@rcag.ac.mn*

Проанализированы сейсмическая и эманацонная активность разломных зон Улаанбаатарского геодинамического полигона, организованного с целью проведения в густонаселенном районе Монголии комплексных исследований опасных геологических процессов. Установлено, что деструкция коры на современном этапе тектогенеза осуществляется в поле сдвига с северо-западной ориентацией оси растяжения и северо-восточной – оси сжатия. При этом развивается сеть из 4 систем разломных зон, активных в сейсмическом и эманацонном отношениях. Крупные правые и левые сдвиги меридиональной и широтной ориентировок играют ключевую роль в процессе деструкции, не подчиняясь сети более древних разломов. Северо-западные и северо-восточные зоны, развиваясь в условиях сжатия и растяжения, напротив, наследуют дизъюнктивы новейшего возраста и при сочленении разломов ортогональной сети располагаются у вершин двугранных углов. Установление стиля современного разломообразования имеет принципиальное значение для оценки сейсмической опасности столицы Монголии, где проживает более одной третьей части населения страны.

Ключевые слова: разломная зона, поле напряжений, землетрясение, радон

FAULTING IN THE EARTH CRUST OF THE ULAANBAATAR GEODYNAMIC TEST SITE (MONGOLIA): RESULTS OF RESEARCH OF RADONIC AND SEISMIC ACTIVITY

¹Konstantin Zh. Seminsky, ²Sodnomsambuu Demberel, ¹Alexander A. Bobrov, ²Dashdondog Mungunsuren

¹Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Irkutsk, 128 Lermontova Str., e-mail: seminsky@crust.irk.ru

²Research Center for Astronomy and Geophysics MAN, Mongolia, Ulaanbaatar, Bayanzurh duureg, Maahuur tolgoi, 5-r horoo, Shua-iyn 7-r bair, e-mail: demberel@rcag.ac.mn

There

There are analysed seismic and radonic activity of the fault zones within the Ulaanbaatar geodynamic test site organized for carrying out of complex researches of dangerous geological processes in the densely populated region of Mongolia. It is established that destruction of crust at the present stage of a tectogenesis is carried out in the stress field with northwest orientation of an axis of extension and northeast – compression axes. Thus the network of 4 systems of fault zones, active in the seismic and emanation relations develops. Large right and left strike-slip faults of sub-longitude and sub-latitude orientations play a key role in the destruction, without submitting to a network of more ancient faults. Northwest and northeast zones, developing in the compression and extension conditions, on the contrary, inherit disjunctives of the Neogene age and at a joint of faults of an orthogonal network settle down at tops of dihedral angles. Establishment of style of a recent faulting has basic value for an assessment of seismic danger of the Mongolian capital where more then one third part of the country population lives.

Keywords: fault zone, stress field, earthquake, radon

Введение

Улаанбаатарский геодинамический полигон в территориальном отношении включает ближайшие окрестности столицы Монголии, где проживает более третьей части населения страны (Рис. 1). Причиной его создания послужила необходимость проведения в густонаселенном районе комплексных исследований современной геодинамической активности, опасным проявлением которой является увеличение числа слабых землетрясений ($M=0,5-4,5$) и их приуроченность к линейно вытянутым (очевидно, разломным) зонам [10]. Кроме анализа сейсмичности, специалистами из разных стран мира в пределах полигона начаты и в течение нескольких последних лет проводятся геодезические, палеосейсмологические, эманационные, структурно-геологические, инженерно-геологические и другие виды исследований, направленных на выявление характера современной активности и оценку степени опасности для урбанизированного региона со стороны разнотипных геологических процессов и явлений.

Исследования тектонических нарушений, проведенные предшественниками, были в основном сконцентрированы на изучении крупных разломных зон Эмээлт и Хустай (Рис. 1), к которым в окрестностях Улаанбаатара приурочены явно выраженные скопления эпицентров землетрясений, произошедших в период 2000-2014 гг. У главных разломных сместителей были выявлены дислокации, свидетельствующие о древних землетрясениях с магнитудой 7,0-7,4 [1-2, 5, 7-8], что, учитывая их повторяемость во времени, может представлять существенную опасность для города. Активность разломов северо-восточного простирания связывается со сжатием земной коры в широтном [2] (до северо-запада–юго-восточного [5]) направлении. Широкий спектр ориентации осей напряжений регионального поля объясняется сложным характером палеосейсмогенных деформаций вблизи крупных разломов. Например, в зоне Хустай выявлены правосдвиговые [8], сбросовые [1] и надвиговые [5] структуры, что может отражать разновозрастные

проявления его активности или специфику подвижек на отдельных сегментах в одном поле напряжений.

Рис.1. Схема распределения плотности эпицентров землетрясений с $M=0,5-4,5$ (в изолиниях), которая послужила основой для выделения разломных зон, активных на современном этапе тектогенеза в пределах Улаанбаатарского геодинамического полигона (Монголия). На врезке – роза-диаграмма простираний сейсмоактивных разломных зон, а также кинематика их систем в сдвиговом поле напряжений 1-го порядка.

1 – изолинии плотности эпицентров землетрясений; 2 – максимумы, в пределах которых плотность эпицентров на единицу площади (25 км^2) больше 25; 3 – центр максимума; 4 – разломные зоны (и их порядковые номера), достоверно (а) и менее достоверно (б) выделяющиеся в поле эпицентров землетрясений; 5 – системы зон, развивающиеся в обстановках правого сдвига (а), левого сдвига (б), растяжения (в) и сжатия (г); 6 – ориентация субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б) для регионального поля напряжений; 7 – новейшие разломы, выявленные на базе линеаментного анализа трехмерной модели рельефа [9] (пунктир – предполагаемое положение); 8 – местоположение и номера участков, в пределах которых была проведена профильная эманационная съемка для оценки радоновой активности разлома, отчетливо выраженного в рельефе.

В этом плане сделанный в данной работе акцент на анализе сейсмологических и эманационных измерений позволяет ограничить временной интервал разрывообразования его современным этапом. Кроме того, предполагается перейти от изучения отдельных разрывов к выделению и анализу разломных систем. Таким образом, цель данной статьи – установить характер современной деструкции земной коры на базе исследований сейсмической и эманационной активности разломов, проведенных для полигона группой российско-монгольских специалистов.

Материал и методы исследований

Фактической основой для решения поставленных задач послужили сейсмологические и эманационные материалы. Первая группа данных представляла информацию Исследовательского центра астрономии и геофизики МАН о сейсмических событиях с $M=0,5-4,5$, произошедших в пределах рассматриваемой территории в период 2000-2014 гг. Распределение плотности этих землетрясений позволило по сгущению изолиний и цепочкам максимумов установить положение на Улаанбаатарском полигоне зон современной сейсмической активности (Рис. 1). Вторая группа данных объединяла измерения объемной активности почвенного радона (Q), полученные в пределах профилей, пересекающих на изучаемой территории разломы, отчетливо выраженные в рельефе уступами. Для проведения эманационной съемки использовался комплект оборудования «КАМЕРА-01», чувствительность которого составляет 0.27 ± 0.03 Бк-1с-1, а пределы допускаемой относительной погрешности не превышают $\pm 30\%$. Разломы были изучены на 15 участках (Рис. 1), для которых в целом получены сотни оценок параметра Q . Материалы эманационной съемки позволили для каждого пересечения установить интенсивность (Q_{max}) и контрастность (KQ) аномалии радона. Второй параметр, согласно ранее проведенным исследованиям [4, 9], дает возможность установить принадлежность изучаемого дизъюнктива к группе разломов с низкой ($KQ \leq 2$), средней ($3 \geq KQ > 2$), повышенной ($5 \geq KQ > 3$), высокой ($10 \geq KQ > 5$) или

сверхвысокой ($KQ > 10$) радоновой активностью, что определяется их современной геодинамической активностью.

Результаты исследований и их обсуждение

В пределах Улаанбаатарского полигона располагается 13 зон повышенной плотности землетрясений, семь из которых выделяется однозначно по цепочечному расположению максимумов и/или вытянутости изолиний плотности. Эти сейсмоактивные структуры, показанные на Рис. 1 серым цветом, образуют 4 системы: субширотную (3, 4, 5), северо-западную (2, 7, 9, 12, 13), субмеридиональную (1, 10) и северо-восточную (6, 8, 11). Выделенные направления в разной степени наследуют сеть новейших разломов, показанных на рисунке 1 черными линиями. Это указывает на разломную природу зон современной сейсмической активности. В то же время, детальный анализ унаследованности выделенных зон не позволяет каждой из них поставить в соответствие разлом новейшего возраста. Так, структуры 3, 4 и 10 занимают секущее положение к рассматриваемым разрывным сетям, а для зон 1, 9, 11 и 12 соответствующие по ориентировке новейшие разломы находятся рядом с их границами.

Вместе с тем, объективность выделения подобных зон подтверждается эманационными данными: радоновая активность разломов, изученных в пределах наиболее важных для дальнейшего анализа зон 1 и 3 (Рис. 1), достигает сверхвысокой степени (на участках № 3, 5 и 14 – $KQ > 10$). Кроме того, показатель радоновой активности KQ для детально изученного разлома Хустай (8 эманационных профилей [4]) не превышает 4,1 за границами центральной области с повышенной плотностью эпицентров землетрясений (Рис. 2). Следовательно, этот крупный дизъюнктив в наиболее молодом поле напряжений полноценно не задействован: в последнее десятилетие динамично развиваются лишь те его фрагменты, которые располагаются в местах пересечения со структурами современной активности, например, субширотной зоной 3. Эта и субпараллельная ей, наиболее протяженная зона 4 развиваются при отсутствии

продольных новейших разрывов за счет подвижек по разломам различных направлений, попавших в границы описываемых зон, что отчетливо видно по положению максимумов плотности эпицентров землетрясений (Рис. 1).

Рис. 2. Изменение сейсмической и радоновой активности вдоль сместителя разлома Хустай

А. Положение эпицентров землетрясений, произошедших в период эманационных измерений в полосе шириной 20 км, протягивающейся вдоль разлома Хустай. Б-В. Изменение вдоль простирания Хустайского разлома параметров радоновой активности, полученных при обработке данных профильной эманационной съемки: Б – вариации степени радоновой активности (Р); В – вариации интенсивности эманационной аномалии. 1 – фрагмент субширотной сейсмоактивной зоны № 3 (см. Рис. 1); 2 – сместитель Хустайского разлома; 3 – точка графика, для которой получено значение параметра (на схеме местности соответствует точке пересечения профиля и сместителя разлома); 4 – сегментированный график, при построении которого значение параметра перенесено с точки измерения на половину расстояния до смежной точки; 5 – положение эпицентра землетрясения, произошедшего на площади исследования в 2013-2014 гг.; 6 – положение (и индексация) профилей эманационной съемки, для которых определены характеристики радоновой аномалии, представленные на графиках Б-В.

Таким образом, структура, выявленная по распределению сейсмичности на Улаанбаатарском полигоне, имеет дизъюнктивную природу и частично наследует сеть новейших разломов. При этом напряженное состояние является

достаточно интенсивным, поскольку при отсутствии в земной коре благоприятно ориентированных разрывов оно реализуется путем развития новых крупных дизъюнктивных зон. Это позволяет, используя ориентировки их систем, сделать предположение о типе поля напряжений, в котором формируется разломная структура полигона на современном этапе тектогенеза.

Пространственные взаимоотношения зон современной активности в пределах полигона (угловые соотношения систем, расположение на местности наиболее крупных представителей и др.) свидетельствуют о том, что разломообразование должно осуществляться в поле сдвига с ориентировкой оси сжатия в направлении ЮЗ-СВ, а оси растяжения – ЮВ-СЗ (Рис. 1, врезка). Действительно, ключевую роль в формировании сети дизъюнктивных структур играют зоны субширотной и субмеридиональной ориентировок, наиболее крупные представители которых (1 и 4) лучше других выделяются цепочками максимумов в эпицентральной поле и выходят за границы полигона (Рис. 1). Это системы сопряженных сдвигов, т.к. вследствие развития в плоскостях действия скалывающих напряжений они практически не наследуют сеть уже существующих разломов. Субширотные зоны являются левыми, а субмеридиональные – правыми сдвигами, поскольку ось сжатия должна занимать биссекторное положение в остром (85°), а ось растяжения – в тупом (95°) углах между сопряженными системами (см. розу-диаграмму на рисунке 1).

Северо-западные и северо-восточные системы в рассматриваемом поле напряжений представлены непротяженными взбросами и сбросами, которые формируются, соответственно, в условиях сжатия и растяжения, наследуя уже существующие разломные сместители (Рис. 1). Особенно ярко это проявляется на северо-западе полигона в биссекторной области между зонами 1 и 3, где землетрясения в последние годы происходят наиболее часто вследствие активизации древнего разлома Эмээлт (зона 2). Высокая ($KQ=5,6$), но непропорционально малая по сравнению с сейсмичностью радоновая активность этого дизъюнктива по отношению к установленной для сдвиговых зон 1

($KQ=14,3$) и 3 ($KQ=17,3$), является косвенным подтверждением ее формирования в доминирующей обстановке сжатия, затрудняющей выход газа к поверхности. В то же время разлом Эмээлт, занимая в совокупности из пяти северо-западных зон положение, наиболее близкое к меридиану, должен развиваться в условиях небольшой транспрессии и, таким образом, в дополнение к вертикальной иметь горизонтальную (правостороннюю) компоненту смещений.

Кинематика, охарактеризованная выше для четырех систем дизъюнктивных зон (Рис. 1, врезка), подтверждается серией дополнительных признаков, локальных по уровню проявления. Это стресс-тензоры, восстановленные Д. Ганзоригом и А. Баттсентсегом для Улаанбаатарского полигона по характеристикам слабых землетрясений (устное сообщение на межд. конференции «Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии», г. Улаанбаатар, 30 сент. – 3 окт. 2014 г.). При всей дискуссионности подобных определений, они в большинстве случаев подтверждают наличие правосторонних подвижек в субмеридиональной зоне 1 и левосдвиговых – в субширотных зонах 3 и 4. Реконструкции для зоны разлома Эмээлт свидетельствуют о поперечной к нему ориентировке сжатия, однако полученные за период наблюдений решения, по-видимому, принадлежат к полям напряжений 2-го порядка, т.к. свидетельствуют о сдвигах по плоскостям, ориентированным косо по отношению к общему протиранию зоны 2.

Заключение

Анализ отчетливо согласующихся между собой сейсмологических и эманационных данных свидетельствует о том, что разломообразование в земной коре Улаанбаатарского геодинамического полигона в настоящее время происходит в региональном поле напряжений, которое является отдаленным результатом Индо-Азиатской коллизии и, согласно [3; и др.], имеет место в некоторых смежных юго-западных регионах. Стиль активного разрывообразования на изученной территории определяется обстановкой сдвига

с ориентацией оси сжатия в направлении ЮЗ-СВ, а оси растяжения – ЮВ-СЗ. В этом поле напряжений получает развитие сеть из четырех направлений разломных зон, причем наиболее крупные представители субширотной и субмеридиональной систем являются лево- и правосторонними сдвигами. Как правило, они пересекают древние тектонические нарушения, вызывая их фрагментарную активизацию, как это, например, характерно для крупного разлома Хустай на современном этапе тектогенеза. Разломные зоны северо-западной и северо-восточной систем, напротив, наследуют сеть разломов новейшего возраста и интенсивно развиваются в обстановках сжатия или растяжения, создающихся в областях сочленения сдвигов у вершин двугранных углов. Такова активизация в условиях сжатия (возможно, со сдвигом) древнего разлома Эмээлт, который в настоящее время контролирует самый интенсивный на полигоне рой слабых землетрясений.

Следует отметить, что применение в дальнейшем дополнительных методов анализа существующих данных, а также накопление новой информации о ходе сейсмического процесса может скорректировать предложенную модель разломообразования. Однако на сегодняшний день она достаточно полно объясняет комплекс проанализированных в статье сейсмологических и эманационных данных, которые были получены в последнее десятилетие на Улаанбаатарском полигоне.

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН Ю.П. Бурзуновой, А.А. Тарасовой, А.К. Семинскому и сотрудникам ИЦАГ МАН М. Оюун-Эрдэнэ и М. Билгууну за помощь в сборе и обработке первичной информации.

Список литературы

1. Дэмбэрэл С., Имаев В.С., Рогожин Е.А., Смекалин О.П., Улзийбат М., Чипизубов А.В. Спектры ускорений колебаний, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // *Вопр. инж. сейсмологии*. – 2013. – Т. 40. – № 1. – С. 19-32.
2. Имаев В.С., Смекалин О.П., Стром А.Л., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Оценка сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монгольская Народная Республика) по результатам сейсмогеологических исследований // *Геология и геофизика*. – 2012. – № 9. – С. 1182-1193.
3. Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // *Геотектоника*. – 2011. – № 5. – С. 52–70.
4. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С., Бурзунова Ю.П., Мунгунсурен Д., Оюун-Эрдэнэ М., Семинский А.К., Билгуун М., Тарасова А.А. Зона Хустайского разлома (Центральная Монголия): результаты эманационной съемки // *Изв. Сиб. отделения секции наук о Земле РАЕН. Геолог., поиски и разв. рудн. месторождений*. 2014. – № 6 (49). – С. 68-81.
5. Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Палеосейсмологические исследования в зоне Хустайского разлома // *Геология и геофизика*. – 2013. – № 7. – С. 940-951.
6. Шерман С.И., Адамович А.Н., Мирошниченко А.И. Моделирование и прогнозная оценка тектонической активности зон сочленений разломов // *Докл. РАН*. – 1987. – Т. 297. – № 4. – С. 824-828.
7. Dujardin J.-R, Bano M., Schlupp A., Ferry M., Munkhuu U., Tsend-Ayush N., Enkhee B. GPR measurements to assess the Emeelt active fault's characteristics in a highly smooth topographic context, Mongolia // *Geophys. J. Int.* – 2014. – Vol. 198. – P. 174-186.
8. Ferry M., Schlupp A., Ulzibat M., Munsch M., Fleury S., Baatarsuren G., Erdenezula D., Munkhsaikhan A., Ankhtsetseg D. Tectonic morphology of the Hustai fault (Northern Mongolia): A source of seismic hazard for the city of Ulaanbaatar // *Geophys. Res. Abstr.* – 2010. – Vol. 12. – EGU 2010-11122.
9. Seminsky K. Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // *The Radiat. measurements*. – 2013. – Vol. 49. – P. 19-34.
10. Ulziibat M., Ichihashi Y., Demberel S. Earthquake hazard in Ulaanbaatar city and its surrounding areas // *Proceedings of USMCA-2011*. – Thailand, 2011.