

АКТИВИЗАЦИЯ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ МОНГОЛИИ В ГОЛОЦЕНЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ МОГОДСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

О.П. Смекалин, А.В. Чипизубов

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

С целью определения сейсмотектонической активности разломов в голоценовое время выполнены тренчинговые исследования могодских дислокаций, возникших при катастрофическом Могодском землетрясении (05.01.1967 г., $M = 7.5-7.8$, $I_0 = 9-10$ баллов) в узле сочленения меридионального Хулжингольского разлома и Тулэтского разлома северо-западного простирания.

Палеосейсмическая интерпретация разрезов сейсмодетформаций и радиоуглеродное датирование проб позволили определить кинематику и впервые получить абсолютный возраст палеособытий, предшествовавших Могодскому землетрясению. Анализ тектонических условий реализации очагов землетрясений объясняет сложное строение дислокаций в эпицентральной области Могодского землетрясения, в пределах которых выделены три отрезка, различающихся амплитудами и кинематикой подвижек. Результаты исследований свидетельствуют о неоднократной активизации Тулэтского и Хулжингольского разломов в позднем плейстоцене—голоцене. Установлен абсолютный возраст наиболее поздней активизации в интервале 596—994 годов н. э. для Тулэтского разлома и в интервале 11379—6235 лет до н. э. для Хулжингольского разлома. По строению деформаций в разрезах канав в зоне Тулэтского разлома определяются как минимум два палеособытия взбросовой кинематики с амплитудой последнего из них 2.8 м. В зоне Хулжингольского разлома палеоземлетрясение имело сдвиговую кинематику. Амплитуды деформаций указывают на то, что в прошлом в разломном узле происходили землетрясения, сопоставимые по энергии с событием 1967 г. или более сильные. Полученные данные о времени доисторических землетрясений и сопровождавших их амплитудах деформаций позволили оценить скорости движений по разломам. Для Хулжингольского разлома скорость сдвига оценивается в интервале 0.2—0.3 м/тыс. лет. Для Тулэтского взброса скорость относительного вертикального смещения крыльев составляет 0.5—0.7 м/тыс. лет.

Активный разлом, сейсмичность, палеоземлетрясение, тренчинг, радиоуглеродное датирование

FAULT ACTIVATION IN CENTRAL MONGOLIA DURING THE HOLOCENE: RESULTS OF STUDY OF THE MOGOD EARTHQUAKE RUPTURES

O.P. Smekalin, A.V. Chipizubov

In order to determine the seismotectonic activity of faults in the Holocene, we performed trench studies of the ruptures produced by the catastrophic Mogod earthquake (5 January 1967, $M = 7.5-7.8$, $I_0 = 9-10$) in the junction zone of the N-S striking Hulzhin Gol fault and the NW striking Tulet fault. Paleoseismic interpretation of seismic-deformation sections and radiocarbon dating of the samples allowed determining the kinematics and obtaining, for the first time, the absolute ages of paleoevents preceding the Mogod earthquake. Analysis of the tectonic conditions for realization of earthquake sources has shed light on the complex structure of ruptures in the area of the Mogod earthquake epicenter, within which three segments differing in the displacement amplitudes and kinematics have been identified. The research data indicate the repeated activation of the Tulet and Hulzhin Gol faults in the Late Pleistocene–Holocene. The absolute age of the latest activation is 596–994 AD for the Tulet fault and 11,379–6235 BC for the Hulzhin Gol fault. The cumulative deformation from paleoearthquakes in the trench sections in the Tulet fault zone points to at least two displacements of thrust kinematics, with the latest of them having an amplitude of 2.8 m. The paleoearthquake in the Hulzhin Gol fault zone is characterized by the presence of lateral slip. The amplitudes of deformations attest to earlier earthquakes similar in energy to the 1967 Mogod event or even stronger in the fault node. The obtained data on the timing of these earthquakes and the amplitudes of the accompanying displacements made it possible to estimate slip rates along the faults: 0.2–0.3 m/kyr horizontal-slip rates on the Hulzhin Gol fault and 0.5–0.7 m/kyr vertical-slip rates on the Tulet fault.

Active fault, seismicity, paleoearthquake, trenching, radiocarbon dating

ВВЕДЕНИЕ

Могодское землетрясение (5 января 1967 г., $M_s \sim 7.5$ [Huang, Chen, 1986]), одно из сильнейших внутриплитных землетрясений, уже на протяжении более чем полувека остается объектом внимания сейсмологов и сейсмогеологов. В публикациях, посвященных этому событию, определены фокальные

механизмы основного толчка и афтершоков [Баяраа, 1971; Москвина, 1978; Tapponnier, Molnar, 1979; Huang, Chen, 1986], детально описаны остаточные сеймотектонические деформации и макросейсмические проявления [Нацаг-Юм и др., 1971; Хилько и др., 1985; Bayasgalan, Jackson, 1999; Рогожин и др., 2008; и др.], но практически не рассматривался сейсмический режим Могодского очага в голоцене. Чтобы восполнить этот пробел и установить повторяемость сильных сейсмических событий, механизм деформаций, реализуемый в очагах доисторических землетрясений, нами в 2017 г. были изучены дислокации Могодского землетрясения в разрезах горных выработок. Основные результаты исследований приводятся в настоящей статье.

Территория восточнее Хангайского поднятия, включая правобережье Орхона, вплоть до 60-х годов XX века относилась к сейсмобезопасным районам в связи со слабой сейсмической активностью. На схеме активных разломов [Апродов, 1960], составленной после экспедиционных работ и изучения материалов дистанционных методов (топокарты, аэрофото), будущая эпицентральная зона Могодского землетрясения расположена вне зон влияния установленных на то время активных разломов. Несмотря на то, что Л. Нацаг-Юмом в 1962—1963 гг. в междуречье Орхона—Тола были обнаружены следы палеосейсмических дислокаций, некоторые из них имеют собственные названия среди местных жителей (Гунжийн Зам, Аврага Могойн Мур, Чингисийн Зам [Нацаг-Юм и др., 1971]), Могодское землетрясение все-таки стало «неожиданным».

При землетрясении 5 января 1967 г. образовалась серия разрывных нарушений по зонам Хулжингольского и Тулэтского разломов. Длина дислокаций по этим разломам составляла 40 и 13 км [Нацаг-Юм и др., 1971]. В настоящее время протяженность дислокаций, фиксируемых по космоснимкам и полевым наблюдениям, сократилась до 18 и 9 км соответственно.

В зоне меридионального Хулжингольского разлома дислокации характеризуются разнообразием форм. На скальных породах это преимущественно линейные или зигзагообразные трещины, часто с пустотами, с вертикальной амплитудой, не превышающей 1.3 м (рис. 1, 2). Приподнятым является восточное крыло. Там, где коренные породы перекрыты рыхлыми осадками, вдоль линии разлома эшелонированной цепью вытягиваются валы сжатия, сопряженные с рвами растяжения, взаимное расположение которых свидетельствует о правостороннем сдвиге. Амплитуда горизонтального смещения, установленная по отдельным реперам в долинах водотоков, достигает 2.5 м [Нацаг-Юм и др., 1971]. Главные разрывы сопровождались большим числом оперяющих трещин с небольшой амплитудой смещения. Наиболее эффективные деформации возникли в заболоченном днище Хулжингольской впадины напротив Могод-сомона. Они представляли собой нагромождения пластов мерзлого грунта высотой до 3 м. Но именно эти образования бесследно исчезли в течение первых лет после землетрясения.

Дислокации Тулэтского разлома (рис. 3) представляют собой прямолинейный взбросовый уступ северо-западного простирания с приподнятым северо-восточным крылом. Высота уступа от 1 до 5 м.

ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Вышедший на поверхность очаг Могодского землетрясения расположен в пределах вулканогенно-осадочной толщи Орхонского раннемезозойского прогиба. Эта тектоническая структура связана с особым мезозойским этапом развития территории Монголии [Томуртоого, 1972] и является наиболее крупной в Орхон-Селенгинской системе прогибов. Орхон-Селенгинская система прогибов с севера ограничена левобережьем долины р. Селенга, занимает всю площадь междуречья Орхона и Толы и протягивается далее на северо-восток на расстояние около 450 км при ширине от 30 до 120 км. С юга Орхон-Селенгинская система через региональный Баянгольский разлом граничит с каледонским складчатым обрамлением Хангай-Хэнтэйской зоны [Тектоника..., 1974]. В неотектоническом плане Баянгольский разлом является одной из ветвей Монголо-Охотского линейamenta и отчетливо трассируется в современном рельефе нанизанными на него межгорными линейными впадинами. Баянгольский разлом также служит южной границей распространения неогеновых базальтов (рис. 4).

Обе тектонические зоны (Орхон-Селенгинская и Хангай-Хэнтэйская) образованы в результате активизации западного фланга Монголо-Охотского пояса на фундаменте из мозаики террейнов активных континентальных окраин, спаянных в кембрийское время в единый Центрально-Монгольский микроконтинент [Tomurtoogo, 2002].

С середины мезозоя, с закрытием структур на западном фланге Монголо-Охотского бассейна [Гордиенко и др., 2019], Орхон-Селенгинская система прогибов испытывает складчато-глыбовые деформации, значительную роль в которых играют движения по вновь возникшим разломам, определившим, в частности, и угловатую форму границ Орхонского прогиба. Разломы имеют преимущественно северо-западное и широтное простирание, что свидетельствует о влиянии на формирование мезозойских структур деструкции каледонского субстрата. Именно такого простирания складки и разрывные

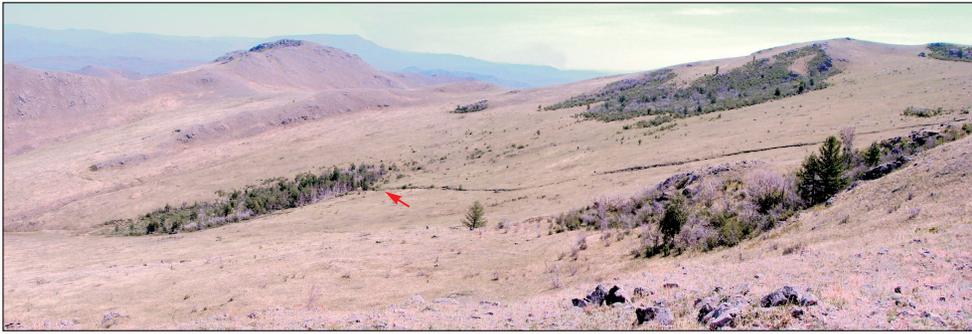


Рис. 1. Одна из меридиональных трещин, образовавшихся при Могодском землетрясении на южном фланге Хулжингольского разлома (северо-восточный склон хр. Тулэт).

Красной стрелкой обозначено место деформаций, показанных на рис. 2. Фото 2007 г.



Рис. 2. Фрагмент дислокации, показанной на рис. 1.

Разрывы дернового слоя на склонах при отсутствии рыхлых осадков сохраняются в первозданном виде на протяжении многих десятилетий в климатических условиях монгольской степи. Фото 2007 г.



Рис. 3. Взбросовый уступ в зоне Тулэтского разлома.

Вид на северо-запад. На переднем плане взбросовым уступом образована тектоническая дамба высотой 1.5—2.5 м, препятствующая сносу по склону в северо-восточном направлении. Фото 2007 г.

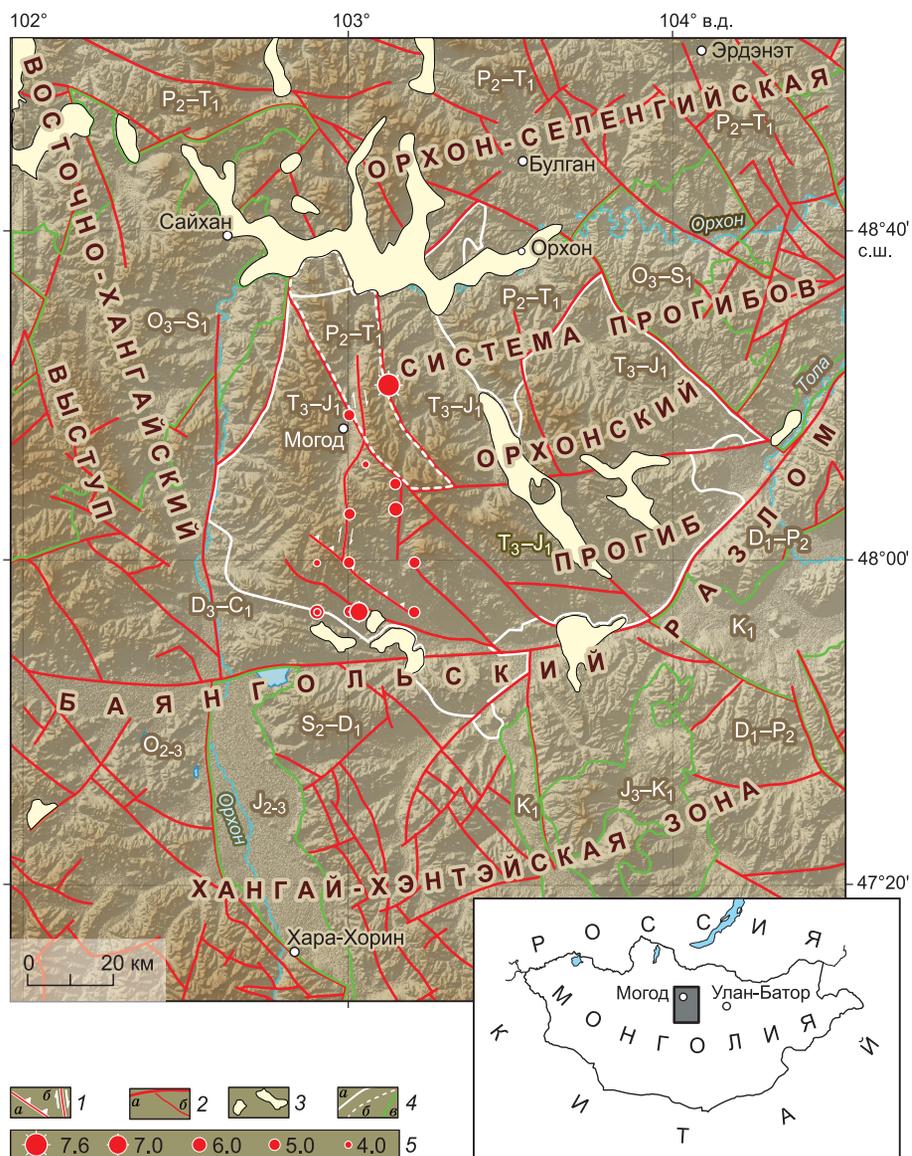


Рис. 4. Сейсмотектоническая схема эпицентральной области Могодского землетрясения и прилегающих территорий.

1 — активизированные разломы: Тулэтский (а) и Хулжингольский (б); 2 — региональный Баянгольский разлом (а) и прочие геологические разломы (б); 3 — неогеновые базальты; 4 — геолого-тектонические границы: мезозойского Орхонского прогиба (а) и горста, рассекающего его северную часть (б), среднепозднемезозойских образований (в), 5 — магнитуда землетрясений. Схема составлена с использованием данных [Tectonic map..., 2002]. Расположение эпицентров землетрясения 05.01.1967 г. и его афтершоков (и их магнитуды) нанесены согласно [Нацаг-Юм и др., 1971].

нарушения характерны для Восточно-Хангайского выступа в левобережье Орхона, в частности, и для Хангайского свода в целом.

В неотектоническом плане к структурам северо-западного простирания в пределах Орхонского прогиба относится пограничное горстовое поднятие хр. Тулэт, к осевой части которого приближен разлом, фрагментарно вскрывшийся при Могодском землетрясении. Вероятной причиной наследования новейшими структурами плана деструкции каледонского фундамента является сокращение мощности пермь-раннетриасовых отложений у южных границ Орхон-Селенгинского прогиба, в отличие от его центральной зоны, где мощность отложений, перекрывающих каледонское основание, превышает 11 км [Тектоника ..., 1974]. В связи с этим на значительной площади Орхон-Селенгинской зоны отсутствуют неотектонические структуры северо-западного простирания.

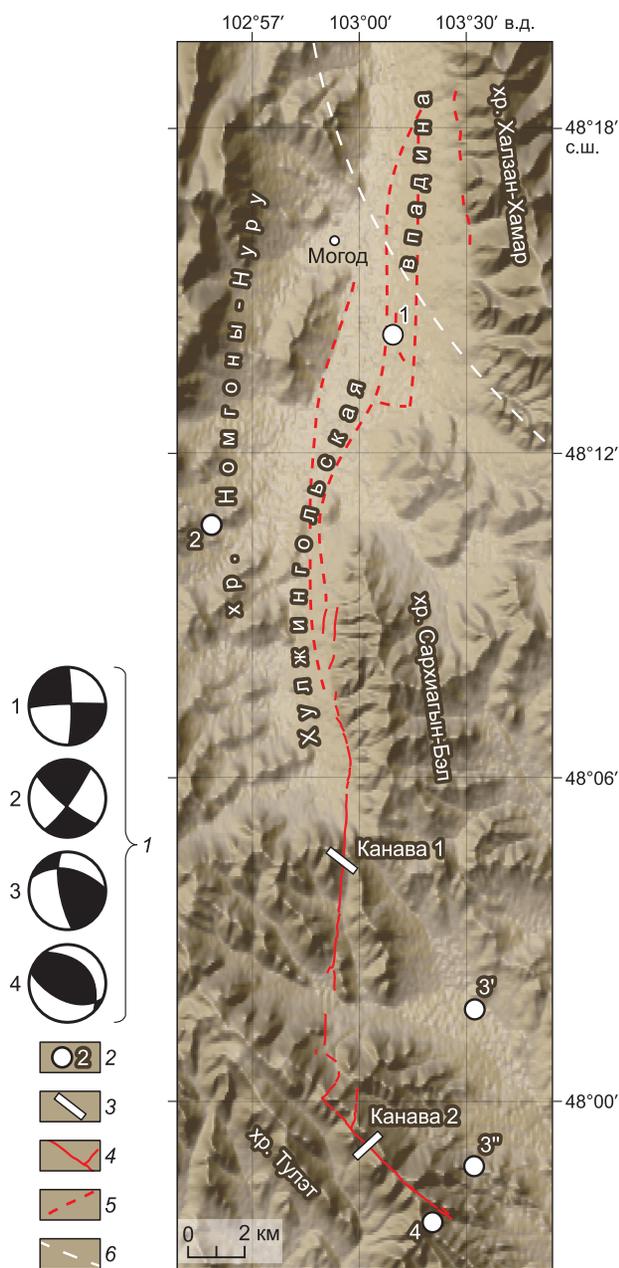


Рис. 5. Схема расположения эпицентров подсобытий землетрясения 05.01.1967 г. и афтершока 20.01.1967 г. и канав в зонах Хулжингольского и Тулэтского разломов.

1 — номера фокальных механизмов: 1—3 — подсобытия главного землетрясения, 4 — афтершока 20.01.1967 г.; 2 — расположение эпицентров с номерами соответствующих фокальных механизмов (для третьего подсобытия определены два альтернативных решения по эпицентрам 3' и 3''); 3 — расположение и ориентация канав; 4 — дислокации Могодского землетрясения, сохранившиеся до настоящего времени; 5 — несохранившиеся дислокации Могодского землетрясения; 6 — Могодский разлом — юго-западная граница Халзанского горста. Расположение эпицентров и фокальные механизмы приводятся по [Huang, Chen, 1986].

Четко обособленная в рельефе новейшая структура Тулэтского горста сформирована благодаря активизации разломов северо-западного простирания, ответвляющихся от зоны Баянгольского разлома. Для юго-запада Орхонского прогиба типичны максимальные (до 3700 м) изопакиты абзогской свиты (T_3) [Томуртоогоо, 1972], что характеризует данную часть Орхонского прогиба как наиболее активную в период его заложения в раннем мезозое. И в период неотектонической активизации оформившееся на этом месте Тулэтское поднятие является наиболее активной морфоструктурой Орхон-Тольского междуречья.

Меридиональные разломы Северной Монголии характерны для границ односторонних грабенов позднего мезозоя. Некоторые из них расположены вблизи контура Орхонского прогиба. Однако Хулжингольский разлом, также меридионального простирания и тяготеющий к западной границе Орхонского прогиба, не имеет связи со структурами мезозойской активизации. По нему заложена надразломная внутригорная впадина шириной не более 4 км и длиной около 40 км. Западное ограничение впадины извилисто в плане и полого переходит в склон хр. Номгоны-Нуру. Восточный борт впадины представлен прямолинейными относитель-

тельно крутыми передовыми фасадами хребтов Халзан-Хамар и Сархиагын-Бэл (рис. 5). В работе [Тектоника..., 1974] высказывается мнение, что сейсмическая активизация меридионально ориентированных впадин связана с влиянием новейших рифтовых («байкальских») структур Северной Монголии.

В плане Хулжингольский разлом в средней части имеет S-образный изгиб, вызванный смещением осевой линии хр. Халзан-Хамар к востоку относительно осевой линии хр. Сархиагын-Бэл. В связи с этим дислокации Могодского землетрясения в зоне Хулжингольского разлома можно условно поделить на два отрезка: южный и северный. Дислокации южного отрезка прижаты к подножию хр. Сархиагын-Бэл, имеют амплитуды горизонтального смещения 1.2—2.5 м и вертикального 0.8—1.3 м. На северном отрезке главные дислокации образовались вдоль осевой линии Хулжингольской впадины, но к настоящему времени сохранились лишь слабовыраженные рвы в подножии хр. Халзан-Хамар. Они имеют длину от нескольких метров до 15—20 м и ширину до полуметра. Непосредственно после землетрясения здесь отмечались прерывистые уступы, обращенные в сторону впадины, с амплитудой вертикального смещения 0.1—0.2 м, редко до 0.35 м. Таким образом, дислокации северного и южного отрезков отличаются как по локации относительно бортов впадины, так и по амплитудам смещения. Это связано, прежде всего, со строением геологических толщ, вмещающих очаг землетрясения.

Северный отрезок дислокаций находится в пределах Халзанского горста северо-западного простирания, в современном эрозионном срезе представленного образованиями перми и нижнего триаса

(см. рис. 5). В процессе мезозойской активизации породы Орхонского прогиба, как и всей Северной Монголии, испытали значительные складчатые и дизъюнктивные деформации. Амплитуда вертикальных перемещений смежных блоков достигала 2—3 км, максимум 4 км [Тектоника..., 1974]. Амплитуда поднятия Халзанского горста была не меньшей, чем мощность поздне триасовых и юрских отложений [Tectonic map..., 2002], слагающих северное крыло Орхонского прогиба. По данным, приведенным в [Томуртоого, 1972; Моссаковский, Томуртоого, 1972], эта амплитуда могла составить более 1800 м (взяты минимальные значения мощностей абзгской свиты (T_3) — 800 м и могодской свиты (T_3-J_1) — 1000 м для центра Орхонского прогиба). Выступ Халзанского горста обусловлен локальным поднятием в каледонском фундаменте прогиба, что определяет различия в свойствах пород, вмещающих очаг землетрясения не только вблизи поверхности, но и на глубинах, близких к фокальному слою.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА И АМПЛИТУД ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При ранее проводимых сейсмогеологических работах [Рогожин, Балжинням, 1995] были детально зафиксированы остаточные деформации поверхности как главные признаки генетического типа дислокаций, их кинематики и энергетических характеристик. В 2007 г. в основании уступа Тулэтского взброса была пройдена вручную небольшая канава, схематический разрез которой приведен в публикации [Рогожин и др., 2008]. В ней была отобрана проба из почвенного горизонта, перекрытого отложениями коллювиального клина. Радиоуглеродный возраст пробы показал, что захоронение почвы произошло при Могодском землетрясении.

В 2017 г. с целью изучения сейсмического режима очага Могодского землетрясения дислокации в зонах Хулжингольского и Тулэтского разломов были вскрыты с помощью экскаватора. Глубина и протяженность канав позволили получить первые кондиционные данные о параметрах палеоземлетрясений. Канава 1 пройдена через дислокации в зоне Хулжингольского разлома, канава 2 вскрыла взбросовый уступ в зоне Тулэтского надвига (см. рис. 5).

Канава 1 имеет длину 30 м и вскрывает поперек три параллельных неглубоких (до 0.5 м) рва с пологими бортами. В продольных стенках канавы непосредственно под почвенно-растительным слоем тальвегов рвов вскрыты деформации в виде вертикальных раскрытых трещин шириной от 0.2 до 0.5 м. Этими трещинами разбит слой плотной «окаменевшей» супеси на глубину от 1.0 до 1.5 м (рис. 6). Глубже этого слоя в относительно рыхлой песчано-дресвяно-щебнистой толще следы трещин теряются. Расстояние между трещинами от 2 до 10 м. Отсутствие вертикальной компоненты перемещений по трещинам свидетельствует о преимущественно сдвиговом смещении разбитых на блоки приповерхностных слоев. То, что трещины выходят непосредственно к дневной поверхности, заполнены рыхлым материалом и пространственно связаны с выраженными на поверхности дислокациями Могодского землетрясения, дает нам основание считать, что эти трещины возникли в 1967 г.

В торцевой стенке канавы 1 при ручной зачистке была вскрыта клиновидная наклонная трещина, заполненная несортированным мелким и средним щебнем из нижележащих слоев (рис. 7). Эта трещина в отличие от трещин, образованных в 1967 г., перекрыта рыхлыми отложениями, в которых залегают погребенные почвенные горизонты как деформированные в результате палеособытия при образовании трещины, так и перекрывающие деформацию. Определение возраста палеособытия осуществлено путем датирования проб из погребенных почв: деформированной трещиной (ЛУ-8794) и перекрывающей трещину (ЛУ-8795). Радиоуглеродный возраст проб и их калиброванные значения (календарная дата) приведены в таблице и на схеме корреляции (рис. 8). Временной интервал разрывообразующего палеособытия заключается в пределах 11379—6235 BC (лет до н. э). Такие особенности в строении деформации, как наличие зияющего пространства между стенками трещины, падение трещины в северо-восточном направлении и поднятие северо-восточного крыла, свидетельствуют о взбрососдвиговом механизме реализации очага

Радиоуглеродные и калиброванные значения возраста проб

№ п/п	Канава	Лабораторный номер	Радиоуглеродный возраст	Календарный возраст, годы
1	1	ЛУ-8794	10800 ± 320	BC 11379 — 9765
2	1	ЛУ-8795	7690 ± 170	BC 7034 — 6235
3	2	ЛУ-8806	1260 ± 110	AD 596 — 996
4	2	ЛУ-8807	1180 ± 80	AD 675 — 994

Примечание. Пробы исследовались в научной лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана СПбГУ. По григорианскому календарю шкала времени делится на два периода: BC — до нашей эры («Before Christ») и AD — нашей эры (от латинского «Anno Domini», что означает «в год нашего Господа»). Калибровка радиоуглеродных образцов выполнена с помощью компьютерной программы CALIB [Stuiver et al., 2018].



Рис. 6. Одна из вертикальных трещин в продольной северо-восточной стенке канавы 1.

Трещиной на глубину 1.0—1.5 м разбит слой плотной окаменевшей супеси. Вверху трещина упирается в тальвег рва растяжения. Расстояние между соседними линиями сетки 1 м. Цифры 21 и 22 — расстояния от северо-западного края канавы (м). Ориентация канавы СЗ 315°—ЮВ 135°.

чения. Для палеоземлетрясения, о котором говорилось выше, мы присваиваем индекс KhPEQ (Kh — Khuljingol, PEQ — PaleoEarthquake). Соответственно, для палеоземлетрясений, следы которых вскрыты в канаве, расположенной в зоне Тулэтского надвига, нами присвоены индексы TuPEQ1 и TuPEQ2.

Канавы 2 (рис. 9) пройдена через сейсмогенный взбросовый уступ и представляет собой расчистку бортов и углубление в тальвеге эрозионного вреза, ортогонально пересекающего линию Тулэтского разлома. В разрезе канавы (рис. 10) отражена суммарная деформация склоновых отложений в результате нескольких разрывообразующих событий, включая землетрясение 1967 г. О мультиплетности обновления уступа свидетельствуют два коллювиальных клина в основании уступа (C_1 и C_2), а также погребенные коллювиальные отложения, представленные слоями (E) и (G). В месте проходки канавы амплитуда

при палеособытии. Так как при изучении могодских дислокаций установлены следы нескольких палеоземлетрясений в зонах Хулжингольского и Тулэтского разломов, то для удобства идентификации и избегания путаницы каждому из палеоземлетрясений нами присвоены краткие латинские обозна-

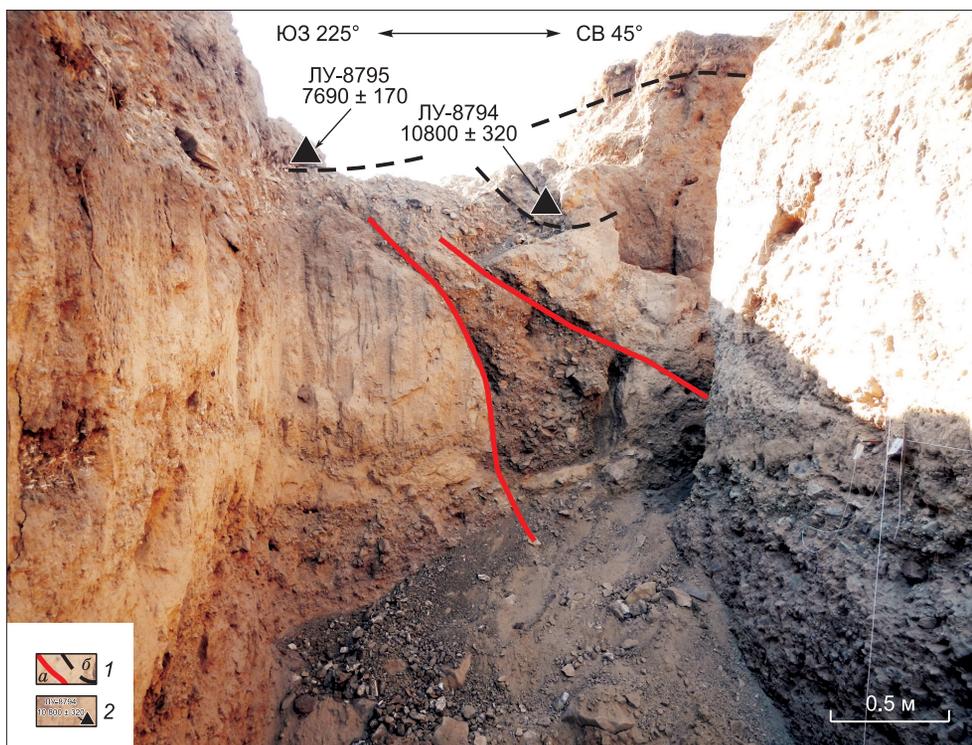


Рис. 7. Трещина в торцовой северо-западной стенке канавы 1.

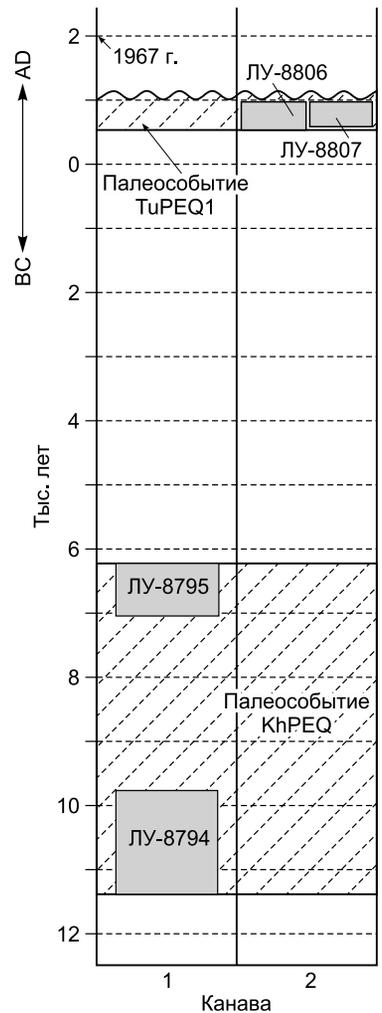
1 — границы бортов трещины (a) и погребенных почвенных слоев (б); 2 — места отбора проб на анализы ^{14}C с указанием лабораторного номера и радиоуглеродного возраста.

Рис. 8. Схема корреляции радиоуглеродных датировок.

Верхняя граница возраста палеоземлетрясения (TuPEQ1) показана волнистой линией. Эта граница либо определяется временем формирования палеопочвы, датированной пр. ЛУ-8807, или несколько моложе нее.

деформаций 1967 г. была незначительной. Отсутствие в подножии уступа в коллювиальном клине (C₂) щебенки из слоя (E) свидетельствует, что деформация 1967 г. не сопровождалась образованием сколько-либо значимой «свободной поверхности», и, вероятнее всего, амплитуда подвижки не превышала мощность современного почвенного покрова (A). О том, что основная по амплитуде деформация, связанная с разрывом слоев (B) и (E), не имеет отношения к землетрясению 1967 г., свидетельствуют датировки радиоуглеродных проб ЛУ-8806 и ЛУ-8807, отобранных из кровли погребенного почвенного слоя (B) и основания коллювиального клина (C₁) соответственно.

Наличие коллювиальных клиньев, наряду с плоскостями разрыва, является основным признаком сейсмического происхождения уступа [Paleoseismology, 2009]. Отложения коллювиального клина (C₁) представлены фрагментами козырьковой части надвинутого при палеоземлетрясении (TuPEQ1) северо-восточного крыла разлома, обрушившейся в течение некоторого времени после подвижки. По вещественному составу коллювиальный клин представлен щебенкой из слоев (E) и (H), перемешанной с темно-серым песком, дресвой и отдельными фрагментами почвы с большим содержанием гумуса почвенного горизонта (B), к моменту палеоземлетрясения покрывшим и приподнятую висячим крылом часть склона. Из одного из таких фрагментов, оказавшегося в основании коллювиального клина, нами была отобрана и датирована радиоуглеродным методом пр. ЛУ-8807. Согласно формальному подходу для определения интервала абсолютного возраста палеособытия, изложенному в [Paleoseismology, 2009], эта датировка может быть принята как верхняя граница интервала времени, в пределах которого произошло событие (TuPEQ1). Коллювиальный клин перекрыл часть почвенного горизонта (B), примыкающую к плоскости разлома (F). Между коллювиальным клином и погребенной почвой (B) есть отчетливая граница в виде слоя сортированного среднезернистого темно-коричневого песка мощностью до 5 см (слой (D) на разрезе канавы). Этот песок осаждался из водных потоков незадолго до палеоземлетрясения (TuPEQ1) или, что менее вероятно, сразу после него до обрушения козырька с висячего крыла.



Основная деформация палеособытия (TuPEQ1) в разрезе канавы связана с разрывом и смещением по плоскости (F) слоев (B) и (E). Границы слоя (E), примыкающие к плоскости разрыва, отчетливо прослеживаются по контрасту цветов — серого у слоя (E) и рыже-серого у супесчано-щебнистой массы (обозначено индексом (H) на разрезе), которая, вероятно, под воздействием сжатия выдавлена вверх и «размазана» вдоль плоскостей разрыва. Для определения нижней грани-

Рис. 9. Канавка 2.

В торцевой стенке видны зеленоватые трахандезитовые порфириды поздне триасового возраста, раздробленные до состояния плотноупакованной дресвы.

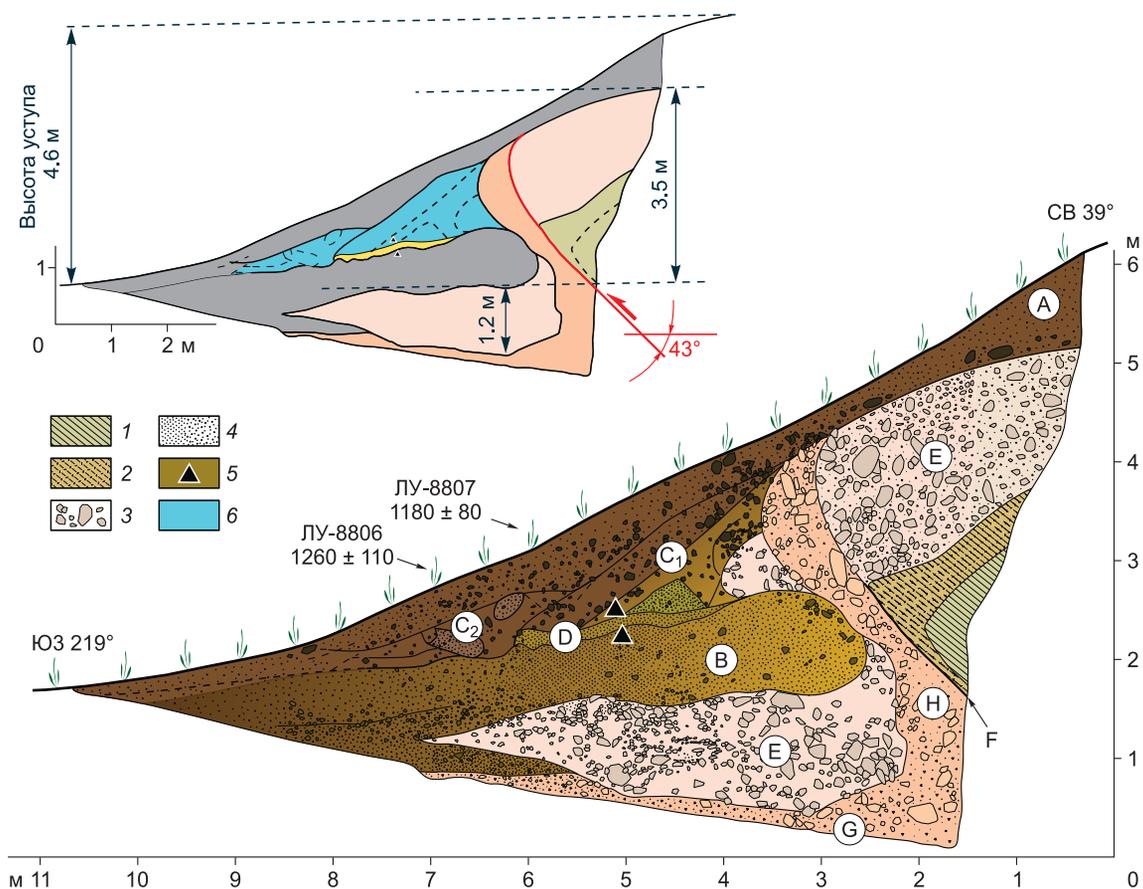


Рис. 10. Разрез северо-западной стенки канавы 2.

1 — коренные кристаллические породы; 2 — то же, в сильно раздробленном виде; 3 — щебенка с песчано-древянным наполнителем; 4 — песок с древесиной; 5 — места отбора проб на радиоуглеродный анализ; 6 — осыпи коллювиального клина, возникшие после палеособытия (TuPEQ1). Вверху упрощенный уменьшенный разрез с основными кинематическими характеристиками: суммарной амплитудой смещения при двух последних землетрясениях (3.5 м) и видимой амплитудой смещения при более ранних землетрясениях (1.2 м). Пояснения см. в тексте.

цы интервального возраста палеособытия (TuPEQ1) из кровли погребенной почвы (B) была отобрана пр. ЛУ-8806 на радиоуглеродный анализ. Близкие значения радиоуглеродных возрастов проб, отобранных из коллювиального клина (C₁) и погребенной под ним почвы (B), свидетельствуют о принадлежности датированных гумусированных слоев единому почвенному горизонту (B) до его разрыва палеосейсмическим событием. Таким образом, значение абсолютного возраста палеоземлетрясения (TuPEQ1) лежит либо в пределах интервала времени, определенного для возраста палеопочвы (596—994 г. н.э., см. таблицу и схему корреляции на рис. 8), либо несколько позднее его. Более определенно можно утверждать, что палеособытие, предшествовавшее землетрясению 1967 г., произошло не ранее 596 г.

Признаки более раннего сейсмического события (TuPEQ2) связаны с надвиганием коренных пород (зеленовато-серых верхнетриасовых трахиандезитовых порфиритов) на рыхлые щебнистые отложения слоя (G). Непосредственно в зоне контакта коренные породы дезинтегрированы до состояния плотноупакованной дресвы.

Простейшие геометрические построения позволяют определить кинематические параметры сейсмических подвижек (верхняя вставка на рис. 10). По разнице высот залегания пологих участков кровли слоя (E) в лежачем и висячем крыльях разлома определяется амплитуда суммарной подвижки при двух последних сейсмических событиях: землетрясении 1967 г. и предшествовавшем ему палеоземлетрясении (TuPEQ1). С учетом крутого падения сместителя (F) вертикальная и горизонтальная компоненты смещения (при отсутствии сдвига по простиранию) практически равны между собой и составляют 3.5 м.

Смещение по плоскости разрыва определяется длиной гипотенузы прямоугольного треугольника (с катетами 3.5 м) и приблизительно равно 5 м. В суммарной амплитуде (3.5 м) доля смещения при землетрясении 1967 г., определяемая по мощности почвенного покрова на неподверженном разрушению

участке висячего крыла, незначительна и составляет не более 0.7 м или 1.0 м взброса по наклонной плоскости разрыва. О кинематике событий, предшествовавших палеоземлетрясению (TuPEQ1), можно лишь сказать, что при одном из них (TuPEQ2) в результате образования уступа по невоскрытому канавой разлому был сформирован выклинивающийся в направлении основания современного уступа слой (E), который можно рассматривать как отложения коллювиального клина. Мощность этого слоя, равная 1.2 м, в первом приближении соответствует амплитуде смещения при палеособытии (TuPEQ2) и практически равна разнице между высотой уступа и суммарной вертикальной амплитудой смещения при землетрясениях 1967 г. и (TuPEQ1).

На основании результатов тренчинговых исследований можно сделать следующие выводы. Дислокации в эпицентральной зоне Могодского землетрясения формировались в течение позднего плейстоцена—голоцена при, как минимум, трех разрывообразующих событиях, включая землетрясение 1967 г. Предшествовавшие событию 1967 г. вскрытия разломов на меридиональной и диагональной ветвях происходили в разное время: последнее палеособытие (TuPEQ1) — не ранее 596 г. в зоне Тулэтского разлома и предпоследнее, более древнее событие (KhPEQ) — около 8.3—13.4 тыс. л. н. в зоне Хулжингольского разлома. Предпоследнему палеособытию (TuPEQ2) зоны Тулэтского разлома, вероятно, соответствует образование трещины, вскрытой в торцевой стенке канавы 1 в зоне Хулжингольского разлома (палеоземлетрясение KhPEQ).

Приблизительные значения скоростей относительного перемещения крыльев разломов определяются следующими расчетами. Максимальное правостороннее смещение по Хулжингольскому разлому в 1967 г. составило 2.5 м [Нацаг-Юм и др., 1971]. Временной интервал между последними двумя событиями составляет от 8202 лет (календарная дата пр. ЛУ-8795, равная BC 6235 + 1967) до 13346 лет (календарная дата пр. ЛУ-8794, равная BC 11379 + 1967). Отношение амплитуды смещения (2.5 м) к значениям границ интервала времени (8202—13346) дает нам интервал приблизительных значений скорости горизонтального смещения 0.2—0.3 м/тыс. лет.

Для определения значения скорости взброса Тулэтского разлома мы исходим из амплитуды разового смещения, определенного палеосейсмической интерпретацией канавы 2. Амплитуда смещения при землетрясении 1967 г. по наклонной плоскости разлома в направлении с северо-востока на юго-запад составила 1.0 м. Максимальное значение временного отрезка между землетрясением 1967 г. и событием (TuPEQ1) составляет 1371 год. Используя эти значения амплитуды и времени получаем минимальное значение скорости взброса, равное 0.73 м/тыс. лет (расчеты выполнены по схеме, представленной в предыдущем абзаце).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

О сеймотектонической активности разбитого на блоки Орхон-Селенгинского прогиба свидетельствуют не только молодой расчлененный рельеф, но и сейсмодислокации, широко распространенные здесь. Они были обнаружены Л. Нацаг-Юмом при сейсмогеологическом обследовании территории в 1962—1963 гг. Что же касается непосредственно дислокаций, образовавшихся в 1967 г., то авторы работы [Нацаг-Юм и др., 1971, с. 78] пишут следующее: «Новообразованные дислокации главным образом связаны с обновлением субмеридионального разлома, имеющего местное название «Гунж Зам» (Дорога Принцессы). Главный разлом Могодского землетрясения является, по сути дела, обновленным фрагментом швов палеосейсмических дислокаций, образовавшихся в историческое время при крупных землетрясениях». Авторы цитированного фрагмента, рассматривая могодские дислокации как единый разлом, не исключают того, что вновь возникшие дислокации не по всей своей протяженности наследуют более древние разрывы, а значит вдоль линии могодской дислокации существуют фрагменты с разным временем обновления (как и с разной степенью сохранности) сейсмодетформаций.

Естественно деление разлома 1967 г. на два основных отрезка: меридиональный и диагональный. Повод рассматривать могодские дислокации не как единый разрыв, а как узел сочленения двух разломов, дают и определения механизма очага землетрясения 5 января 1967 г. Неоднозначность в определении механизма очага и расчетов сейсмического момента связывается сейсмологами со сложными процессами в очаге, предопределившими значительную длительность вступления *P*-волн [Huang, Chen, 1986]. В работе [Москвина, 1978, с. 6] говорится, что «...процесс в очаге имел сложный характер многократного испарывания, осуществившегося в виде серии толчков... При таком характере испарывания механизм очага, определенный по знакам первых вступлений *P*-волн, может и не отражать всей сложности очагового процесса, будучи справедливым только для его начальной фазы».

Построения, выполненные авторами работы [Huang, Chen, 1986] при тщательном изучении *P*-волн, позволили им сделать предположение, что главный толчок, вероятнее всего, является комбинированным, состоящим из трех подсобытий, различающихся энергией и фокальными механизмами. Эпицентры подсобытий и их фокальные механизмы приведены на рис. 5. Процесс испарывания шел с се-

ра на юг и для первых двух подсобытий механизм определяется как правосторонний сдвиг. Третье подсобытие имеет ярко выраженную взбросовую компоненту. Определенно взбросовый механизм имеет и наиболее сильный из афтершоков (20 января 1967 г., $M_s = 7.0$), эпицентр которого приближен к южной, Тулэтской, ветви могодских дислокаций, а обе нодальные плоскости имеют северо-западное простираение. Эпицентр этого афтершока практически совпадает с эпицентром одного из альтернативных решений для третьего подсобытия главного толчка Могодского землетрясения.

Разделяя главный толчок на три подсобытия, авторы статьи [Huang, Chen, 1986, p. 374], тем не менее рассматривают дислокации Могодского землетрясения, принадлежащие единому разлому, у которого близ южного фланга простираение плавно меняется с субмеридионального на юго-восточное, что и отражено в блок-диаграмме, в подписи к которой говорится, что «крутопадающий на восток сдвиг имеет небольшой изгиб у своего южного фланга, где происходит еще и взбросообразование». Однако с помощью космических снимков (а также при наземном обследовании) устанавливается, что и Хулжингольская, и Тулэтская ветви дислокаций практически прямолинейны вплоть до их пересечения и в месте пересечения сходятся под прямым углом. Приподнятый блок вблизи места пересечения разломов разбит множеством трещин как параллельных меридиональной ветви дислокаций, так и расположенных косо по отношению к ней. Максимальным сосредоточением разрывов характеризуется не только разломный узел, но и северное окончание меридиональной ветви, что свидетельствует о концентрации напряжений на концах Хулжингольского разрыва и является еще одним подтверждением его существования и развития как самостоятельной структуры.

Если с активностью Хулжингольского разлома связано формирование надразломной внутригорной впадины, то Тулэтский разлом — это, прежде всего, результат новейшей активности Тулэтского поднятия. Его неотектоническая активизация отражена в наличии более древних следов подвижек по разломам, параллельных Тулэтской ветви дислокаций, располагающихся как к юго-западу, так и к северо-востоку от нее. Вертикальные смещения по этим разломам придают юго-западному и северо-восточному склонам Тулэтского поднятия ступенчатую форму. Ступени отчетливо трассируются выходами скальных останцев порфиритового состава. Эти разломы превышают протяженность Тулэтской ветви дислокаций и после пересечения меридиональной Хулжингольской ветви протягиваются на значительное расстояние в северо-западном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение сейсмодислокаций Могодского землетрясения в разрезах горных выработок позволило впервые оценить активность сейсмического очага на протяжении голоцена. Применение тренчинга дало возможность получить абсолютный возраст доисторических землетрясений, кинематику и амплитуды разовых смещений. Выполненные исследования по определению абсолютного возраста на разных ветвях могодских дислокаций и анализ геолого-тектонического строения эпицентральной области дают основание предполагать о независимой активизации Хулжингольского и Тулэтского разломов в доисторическом прошлом. Более молодым является обновление Тулэтского разлома. Кинематические характеристики палеоземлетрясений свидетельствуют о постоянстве напряженно-деформированных свойств земной коры и тектонических процессов, определяющих формирование современного рельефа рассматриваемой территории. Проведенные исследования показывают, что сейсмотектонические проявления очага Могодского землетрясения зависят от строения вмещающей очаг геологической среды, сформированной поступательным ходом геологической истории.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность монгольским коллегам академику Монгольской академии наук С. Демберелу и А. Баясгалану за помощь в организации и проведении полевых работ.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00357 А и проекта Минобрнауки России № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».

ЛИТЕРАТУРА

Апродов В.А. О неотектонике и сейсмичности территории Монгольской народной республики // Бюллетень совета по сейсмологии № 10. Вопросы сейсмотектоники Прибайкалья и смежных территорий. М., Академия наук СССР, 1960, с. 121—133.

Баяраа Г. Могодын газар хэдлэлийн гололитын механизм // Эрдэм шинжилгээн бүтээл, 1971, № 9, с. 68—73 (на монг.).

Гордиенко И.В., Метелкин Д.В., Ветлужских Л.И. Строение Монголо-Охотского складчатого пояса и проблема выделения Амурского микроконтинента // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (3), с. 318—341.

- Москвина А.Г.** Механизм и параметры очага Могодского землетрясения 5 января 1967 г. и его афтершоков // Физика Земли, 1978, № 1, с. 3—17.
- Моссаковский А.А., Томуртоого О.** Схема стратиграфии пермских и раннемезозойских вулканогенно-осадочных образований Орхон-Селенгинского прогиба // Докл. АН СССР, 1972, т. 206, № 5, с. 1181—1184.
- Нацаг-Юм Л., Балжинням И., Монхо Д.** Сейсмическое районирование Улан-Батора. М., Наука, 1971, 206 с.
- Рогожин Е.А., Балжинням И.** Новые данные о геологических проявлениях Могодского землетрясения 1967 г. (Центральная Монголия) // ДАН, 1995, т. 340, № 3, с. 400—403.
- Рогожин Е.А., Имаев В.С., Смекалин О.П., Шварц Д.** Тектоническая позиция и геологические проявления Могодского землетрясения 5 января 1967 г. в Центральной Монголии (взгляд сорок лет спустя) // Физика Земли, 2008, № 8, с. 70—82.
- Тектоника Монгольской Народной Республики** / Ред. А.Л. Яншин. М., Наука, 1974, 284 с.
- Томуртоого О.** Тектоника и история развития Орхонской впадины (север Центральной Монголии) // Геотектоника, 1972, № 3, с. 61—74.
- Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Балжинням И., Монхоо Д.** Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М., Наука, 1985, 224 с.
- Bayasgalan A., Jackson J.A.** A re-assessment of the faulting in the 1967 Mogod earthquakes in Mongolia // Geophys. J. Int., 1999, v. 138, p. 784—800.
- Huang J., Chen W.P.** Source mechanisms of the Mogod earthquake sequence of 1967 and the event of 1974 July 4 in Mongolia // Geophys. J. R. Astr. Soc., 1986, v. 84, p. 361—379.
- Paleoseismology** / Ed. J. McCalpin. 2nd ed. Amsterdam, London, Academic Press, 2009, 629 p.
- Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W.** CALIB 7.1, 2018, (WWW program), <http://calib.org>, accessed 2018-11-14.
- Tapponnier P., Molnar P.** Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal regions // J. Geophys. Res. Solid Earth, 1979, v. 84 (B7), p. 3425—3459.
- Tectonic map** of Mongolia. Scale of 1:1,000,000. Geological Information Center, MRAM 2002.
- Tomurtoого О.** Tectonics of Mongolia. A brief explanatory note to the tectonic map of Mongolia at a scale of 1:1.000.000. Geological Information Center, MRAM 2002, 42 p.

*Поступила в редакцию 30 апреля 2020 г.,
принята в печать 8 сентября 2020 г.*