

УДК 551: 550.34

ХУБСУГУЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 12.01.2021 С $M_w = 6.7$ В СЕВЕРНОЙ МОНГОЛИИ: ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ОЧАГА

© 2023 г. А. Н. Овсяченко^{1,2,*}, С. Дэмбэрэл³, Ю. В. Бутанаев^{2,4},
Н. Г. Кошевой^{1,2}, Ц. Батсайхан⁴, Н. Баатар⁴

Представлено академиком РАН В.В. Ярмолюком 13.03.2023 г.

Поступило 13.03.2023 г.

После доработки 15.03.2023 г.

Принято к публикации 16.03.2023 г.

Изучены и закартированы геологические эффекты Хубсугульского землетрясения 12.01.2021 г. с $M_w = 6.7$, ставшего сильнейшем в Прихубсугулье на инструментальном этапе сейсмологических наблюдений. С использованием шкалы ESI-2007 ооконтурена эпицентральная зона с интенсивностью 8 баллов. Выход очага землетрясения на поверхность представлен правосторонним сбросо-сдвигом с амплитудой смещения до 20 см, обновившим позднеголоценовый тектонический уступ в западном борту Хубсугульской рифтовой впадины. Динамика разрывообразования в позднем голоцене свидетельствует о постепенном разрастании впадины за счет деструкции прилегающего горного массива. Данные спутниковой интерферометрии и сейсмологических наблюдений хорошо согласуются с результатами полевых исследований, что позволяет рассматривать выделенную область максимальных сотрясений в качестве проекции верхней части очаговой зоны на поверхность.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмический очаг, сеймотектоника, активные разломы, Монголия, Хубсугул

DOI: 10.31857/S2686739723600455, EDN: RYKIPL

Известно, что сейсмичность является отражением современных тектонических процессов в недрах Земли. Геологические проявления землетрясений на поверхности позволяют получить прямые данные о макросейсмическом эффекте в ближней зоне, пространственных параметрах сейсмического очага и истории таких событий в ближайшем прошлом [5]. Изучение каждого современного сильного землетрясения по соответствующей методике дает новые данные о закономерностях устройства очаговых зон и направленности современных геодинамических процессов в условиях конкретной сеймотектонической структуры.

Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 произошло на юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы (БРС) и стало сильнейшим сейсмическим событием Прихубсугулья за инструментальный период наблюдений (рис. 1). Для БРС имеются хорошо проработанные геодинамические модели. Однако среди представительно изученных в сеймотектоническом отношении сильных землетрясений БРС, для которых были детально изучены сеймотектонические проявления на поверхности и составлены представления о тектоническом устройстве очага, можно отметить лишь Мондинское 1950 г. с $M_s = 7$ [11] и Муйское 1957 г. с $M_s = 7.6$ [6]. Эти события вместе с Тас-Юряхским землетрясением 1967 г. ($M_s = 7$) стали сильнейшими в БРС за инструментальный период наблюдений. Таким образом, с точки зрения изученности сеймотектонических

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

² Геологический институт Российской академии наук,
Москва, Россия

³ Институт астрономии и геофизики
Монгольской академии наук, Улан-Батор, Монголия

⁴ Тувинский институт комплексного освоения природных
ресурсов Сибирского отделения Российской академии
наук, Кызыл, Россия

*E-mail: ovs@ifz.ru

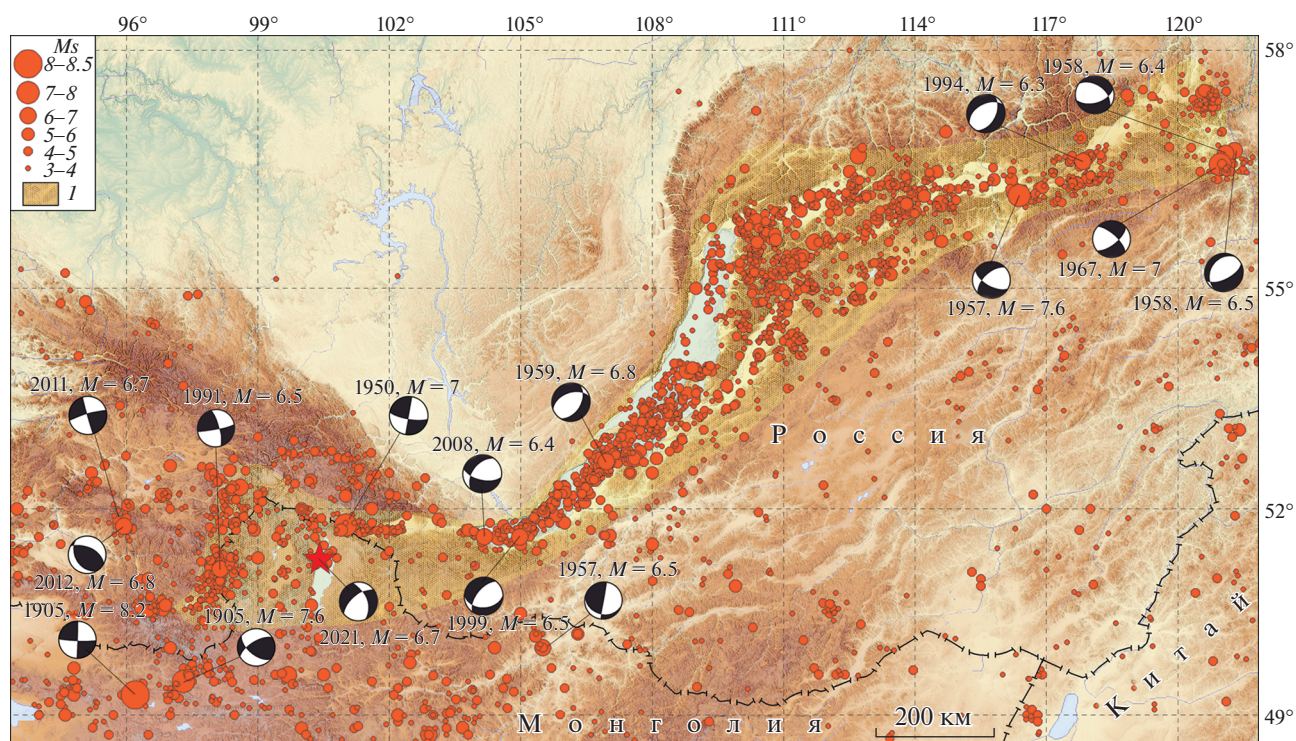


Рис. 1. Положение эпицентра Хубсугульского землетрясения 2021 г. (показан звездочкой) на карте сейсмичности Байкальской рифтовой системы и прилегающих территорий. Эпицентры землетрясений с 1900 г. по данным СКЗ ОСР-2012 (www.seismorus.ru) и ЕГС РАН (<http://www.ceme.gsras.ru>). Для сильнейших сейсмических событий приведены механизмы очагов по данным: [3, 13]. Механизм очага Хубсугульского землетрясения 2021 г. по данным [10]. 1 — Байкальская рифтовая система.

условий возникновения сильных землетрясений БРС прямыми методами, имеется определенный “дефицит”.

По данным Алтае-Саянского и Байкальского филиалов ЕГС РАН Хубсугульское землетрясение имело $M_w = 6.7$, $M_L = 6.9$, глубину очага порядка 8 км, расчетная интенсивность сотрясений в эпицентре составила $I_0 = 9$ баллов [2]. Полученные различными авторами решения фокального механизма отличаются слабо и свидетельствуют о преимущественно сбросовой кинематике смещения в очаге со сдвиговой компонентой [2, 8–10]. Такой механизм в целом типичен для БРС и отражает деформационный режим трансенсии (растяжение со сдвигом).

В тектоническом отношении очаг расположен в западном борту Хубсугульской рифтовой впадины. Впадина развивается в условиях растяжения и имеет структуру асимметричного полуграбена с крутым западным и пологим восточным бортом [4]. В строении впадины основную роль играют активные сбросы и сбросо-сдвиги субмеридиональной ориентировки, ограничивающие западный борт впадины. Сдвиговая компонента вдоль разломов северо-западного простирания имеет правостороннюю направленность и левосторон-

ную при северо-восточной ориентировке [1]. Эпицентр локализован в акватории оз. Хубсугул, что вызвало затруднения в привязке к конкретному разлому.

Первичное геологическое обследование эпицентральной области было выполнено через три дня после землетрясения специалистами института астрономии и геофизики Монгольской академии наук [8]. Тогда были выявлены только вторичные нарушения, представленные сейсмовибрационными трещинами и выбросами обводненного песка на равнине у оз. Хубсугул.

В августе 2022 г. нами было выполнено полевое сеймотектоническое исследование очаговой зоны землетрясения. Землетрясение не привело к жертвам и разрушениям даже в эпицентральной зоне. Закартированные нарушения четко делятся на две группы: первичные, непосредственно отражающие выход очага землетрясения на поверхность в виде сеймотектонического разрыва, и вторичные, представляющие собой результат сейсмических сотрясений (рис. 2).

Распространение вторичных нарушений определяется геоморфологическими условиями и расстоянием до очага. Они представлены мелкими обвалами, осыпями, камнепадами, встряхнутыми

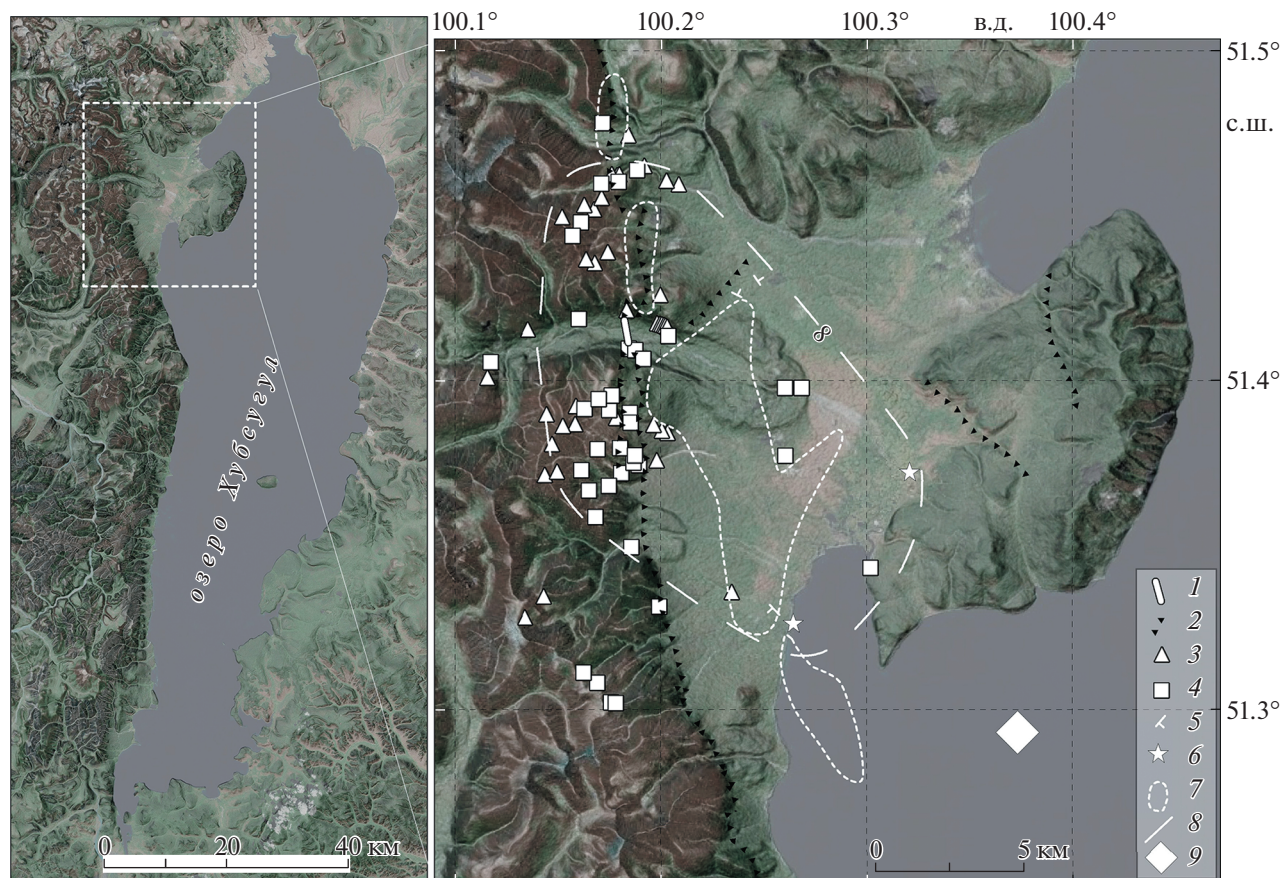


Рис. 2. Карта геологических эффектов Хубсугульского землетрясения в сопоставлении с сейсмологическими данными. 1 – сейморазрыв; 2 – тектонические уступы; 3 – обвалы; 4 – камнепады; 5 – сейсмовибрационные трещины; 6 – выбросы песка (разжижения); 7 – максимальная плотность афтершоков (35–47 в пределах круга радиусом 0.02°) по данным: [2]; 8 – изосейста 8 баллов по шкале ESI-2007 (контур эпицентральной зоны); 9 – эпицентр землетрясения по данным: [2].

склонами, сейсмогравитационными трещинами на бровках склонов водоразделов и уступов террас, сейсмовибрационными трещинами и выбросами обводненного песка на поверхности заболоченной аккумулятивной равнины у оз. Хубсугул (рис. 3, а, б). Для оценки интенсивности сотрясений по параметрам вторичных нарушений использована шкала ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity), соответствующая традиционным шкалам типа MSK-64 и EMS-98 [12], тестированная нами на нескольких современных аналогах, в том числе и в эпицентральной зоне Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. [5]. По средним размерам сейсмовибрационных трещин (длина 25–40 м при ширине до 30 см), величине отброшенных со склонов глыб (до 2.5×3 м на 25–30 м), объему обвалов (20–30 тыс. м³) получена интенсивность 8 баллов, которой соответствуют и параметры сеймотектонических нарушений. По этим данным получены контуры эпицентральной зоны.

В месте сгущения вторичных нарушений был обнаружен выход очага землетрясения на поверхность – сеймотектонический разрыв, представленный правосторонним сбросо-сдвигом со смещением до 20 см в вертикальной и столько же в горизонтальной плоскости (рис. 3, в, г). Разрыв смещает все формы рельефа на своем пути, кустарниково-моховой покров, камни, корни и стволы деревьев, по которым замерены амплитуды смещения. Разрыв имеет ССЗ-простираение (340°–350°) и прослежен на расстояние около 250 м. Небольшая длина прослеженного разрыва, по всей видимости, обусловлена его слабой выразительностью и небольшим смещением.

Тектоническая природа разрыва подчеркивается приуроченностью к тектоническому уступу, сформированному предыдущими подвижками. Вкрест простираения уступа высотой около 1 м, обновленного при землетрясении 2021 г., была пройдена траншея, в которой выявлен сброс с падением под углом 50°–70° в восточном направлении



Рис. 3. Фото вторичных и первичных эффектов Хубсугульского землетрясения: а — обвал; б — отброшенная глыба с ударной вмятиной; в, г — сейсмотектонические разрывы сдвиговой кинематики.

(рис. 4). На бровке уступа разрыв смещает современную земную поверхность и почву на 15–20 см. В основании уступа вскрыты разрывы предыдущих землетрясений, которые последовательно захватывали в опускание все новые участки со стороны хребта. Таким образом, динамика разрывообразования во времени и пространстве свидетельствует об экспансии впадины в западном направлении с последовательным захватом и деструкцией прилегающего горного поднятия.

Обновленный тектонический уступ входит в эшелонированную систему тектонических уступов, закартированных в подножии хребта на западном ограничении Хубсугульской впадины (см. рис. 2). Уступы имеют позднеголоценовый возраст, нарушают поверхности морен и речных террас в речных долинах, а между ними выражены цепочкой треугольных тектонических фасет.

По инструментальным данным эпицентр землетрясения зарегистрирован в 18–19 км к юго-востоку от обнаруженного нами выхода очага на поверхность. Очагу соответствует область максимальной концентрации афтершоков [2]. Выход очага на поверхность соответствует линии с резкой сменой интерференционной картины по данным спутниковой радарной интерферомет-

рии. Модель разрыва по этим данным представлена плоскостью с СЗ-простираем (340° – 350°) и углом падения 45° – 54° в восточном направлении, т.е. в сторону гипоцентра, достигая глубины 18–24 км [7–10]. Максимальная величина смещения (1.2 м) по результатам моделирования предполагается на глубине 7 км, а на поверхности зафиксировано опускание до 20 см [8, 10].

Данные моделирования и сейсмологических наблюдений хорошо согласуются с результатами полевых исследований. Выделенная нами область максимальных сотрясений соответствует области максимальной концентрации афтершоков по сейсмологическим данным и представляет собой проекцию верхней части очага на поверхность. Очаг погружается в юго-восточном направлении, т.е. в сторону инструментального эпицентра и осевой части Хубсугульской впадины, под углом 50° – 70° (см. рис. 2). Он имеет закономерную морфоструктурную позицию и приурочен к активному борту асимметричной Хубсугульской рифтовой впадины, который испытывает смещение в сторону прилегающего горного массива с последовательным захватом в опускание новых участков при каждом новом землетрясении.

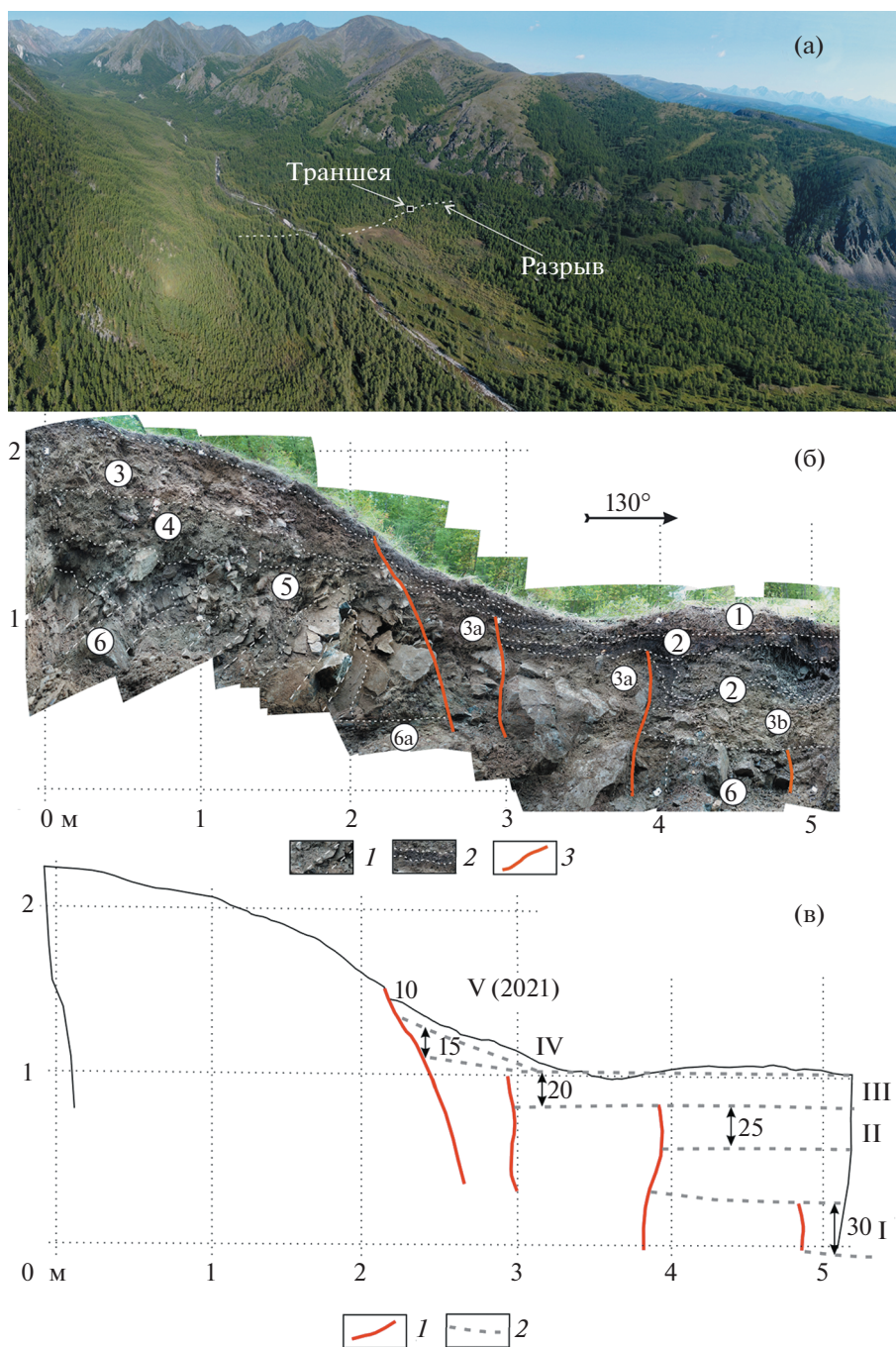


Рис. 4. Сейсморазрыв Хубсугульского землетрясения, положение и документация траншеи. а – аэрофотоснимок с положением закартированного участка сейсморазрыва и траншеи. б – фотопанорама северной стенки и интерпретация разреза траншеи. 1 – трещиноватость в коренных породах; 2 – границы слоев; 3 – разрывы. Цифры в кружках: 1 – дёрн; 2 – торф; 3 – рыхлые, пылеватые суглинки с щебнем и дресвой (склоновые отложения), 3 а – то же, с глыбами (коллювий), 3 б – то же, плотные, комковатые, оглеенные; 4 – серо-зеленые супеси с редким щебнем и дресвой (тонкодисперсная кора выветривания); 5 – щебень, глыбы с супесчаным заполнителем (обломочная кора выветривания); 6 – ультраосновные, сильнотрещиноватые коренные породы, 6 а – то же, выветрелые до глины. в – реконструкция последовательности подвижек. 1 – разрывы; 2 – положение опущенных фрагментов древней земной поверхности (цифрами указаны амплитуды смещений, см). Римскими цифрами пронумерована последовательность сейсмотектонических смещений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00049.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанникова А.В., Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. Позднекайнозойская кинематика активных разломов Хубсугульской впадины (юго-западный фланг Байкальской рифтовой системы) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1202–1224.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В. и др. Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 г. $M_w = 6.7$, $M_L = 6.9$ и афтершоки начального периода. // Физика Земли. 2022. № 1. С. 83–89.
3. Имаева Л.П., Имаев В.С., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В. Карта сейсмоструктуры Восточной Сибири. Иркутск-Нерюнгри: ТИ (ф) СВФУ. 2015. 128 с.
4. Кочетков В.М., Хилько С.Д., Зорин Ю.А. и др. Сейсмоструктура и сейсмичность Прихубсугулья / Отв. ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1993. 184 с.
5. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Ларьков А.С. Очаг сильного землетрясения как геологический объект // Геотектоника. 2021. № 3. С. 3–30.
6. Солоненко В.П. Живая тектоника в плейстосейстовой области Муйского землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1965. № 4. С. 58–70.
7. Тимошкина Е.П., Михайлов В.О., Смирнов В.Б., Волкова М.С., Хайретдинов С.А. Модель поверхности разрыва Хубсугульского землетрясения 12.01. 2021 по данным спутниковой РСА интерферометрии // Физика Земли. 2022. № 1. С. 83–89.
8. Battogtokh D., Bayasgalan A., Wang K., Ganzorig D., Bayaraa J. The 2021 $M_w = 6.7$ Khankh earthquake in the Khuvsgul rift, Mongolia. // Mongolian Geoscientist. 2021. 26(52). P. 46–61.
9. He Y., Wang T., Zhao L. The 2021 $M_w 6.7$ Lake Hovsgol (Mongolia) Earthquake: Irregular Normal Faulting with Slip Partitioning Controlled by an Adjacent Strike-Slip Fault. // Remote Sens. 2022. 14. 4553.
10. Liu X., Xu W., Radziminovich N.A., Fang N., Xie L. Transensional coseismic fault slip of the 2021 $M_w 6.7$ Turt Earthquake and heterogeneous tectonic stress surrounding the Hovsgol Basin, Northwest Mongolia. // Tectonophysics. 2022. V. 836. 229407.
11. Lunina O., Andreev A., Gladkov A. The 1950 $M_w = 6.9$ Mondy earthquake in southern East Siberia and associated deformations: Facts and uncertainties // Journal of Seismology. 2015. № 19. P. 171–189.
12. Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpınar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007. // Special paper APAT, Memorie descrittive della carta geologica d'Italia. 2007. V. 74. P. 41.
13. Radziminovich N., Bayaraa G., Miroshnichenko A., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Lukhnev A. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. V. 7. № 1. P. 23–38.

KHUBSGUL EARTHQUAKE OF JANUARY 12, 2021, $M_w = 6.7$, NORTHERN MONGOLIA: GEOLOGICAL EFFECTS AND TECTONIC POSITION OF THE SOURCE

A. N. Ovsyuchenko^{a,b,#}, S. Demberel^c, Y. V. Butanayev^{b,d}, N. G. Koshevoy^{a,b},
T. Batsaikhan^c, and N. Baatar^c

^a Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

^d Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation

[#]E-mail: ovs@ifz.ru

Presented by Academician of the RAS V.V. Yarmolyuk March 13, 2023

The geological effects of the Khubsugul earthquake on January 12, 2021 with $M_w = 6.7$, which became the strongest in the Khubsugul region at the instrumental stage of seismological observations, were studied and mapped. Using the ESI-2007 scale, the epicentral zone was contoured with an intensity VIII. The primary seismic rupture is represented by a dextral normal fault with displacement up to 20 cm, which renewed the Late Holocene tectonic scarp in the western side of the Khubsugul rift basin. The dynamics of rupturing in the Late Holocene testifies to the gradual expansion of the depression due to the destruction of the adjacent mountain range. The data of satellite interferometry and seismological observations are in good agreement with the results of field studies, which allows us to consider the selected region of maximum shaking as a projection of the upper part of the source zone onto the surface.

Keywords: earthquake, seismic source, seismotectonics, active faults, Mongolia, Khubsugul