

## ЭНЕРГИЯ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЛИТОСФЕРЫ МОНГОЛИИ

© 2012 г. А. В. Ключевский, В. М. Демьянович, С. Дэмбэрэл, Б. Лхагвадорж

Представлено академиком Г.С. Голицыным 10.11.2011 г.

Поступило 07.11.2011 г.

Информация о сильных землетрясениях Монголии за инструментально-исторический период обобщена в карте-схеме энергии сейсмостектонических деформаций литосферы, которая поставлена в соответствие карте общего сейсмического районирования территории Монголии. Полученные результаты характеризуют энергию сейсмостектонических деформаций литосферы в абсолютных единицах, что удобно для проектирования и строительства. Разрабатываемый подход к оценке энергии сейсмостектонических деформаций рекомендуется к использованию с целью развития современных проектно-изыскательских, конструкторских и строительных технологий в рамках проблемы обеспечения сейсмической безопасности в регионах.

Значительная часть территории Монголии расположена в высокосейсмичных областях Центрально-Азиатского складчатого пояса и подвержена частым и сильным землетрясениям [1]. Особенно опасны в сейсмическом отношении Монгольский и Гобийский Алтай: только в XX в. здесь произошли несколько десятков землетрясений с магнитудой  $M \geq 6$  (интенсивностью  $I_0$  от 8 до 11–12 баллов) (рис. 1). Некоторые землетрясения вызвали нарушения земной поверхности в десятки километров, а сейсмические катастрофы (Боланское 1905 г., Монголо-Алтайское 1931 г. и Гоби-Алтайское 1957 г.) сопровождались сейсмостектоническими деформациями протяженностью до нескольких сотен километров. Судя по сохранившимся следам древних землетрясений и летописным сведениям подобные и, возможно, более грандиозные сейсмические события происходили здесь в недавнем прошлом. Поскольку решение проблем сейсмической безопасности является составной задачей социально-экономического развития сейсмоактивных регионов, то

понимание важности создания и безопасной эксплуатации территориально-промышленных комплексов и стратегических транспортных коридоров в Монголо-Байкальском регионе предопределяет актуальность детального изучения геодинамических и сейсмических процессов в зонах активных разломов при сейсмическом районировании территорий [2, 3].

В настоящее время в очаговой сейсмологии широкое применение получил сейсмический момент — параметр, характеризующий работу по перемещению “очагового” блока в стесненных условиях литосферы [4, 5]. Этот параметр определяется как

$$M_0 = \mu SD, \quad (1)$$

где  $\mu$  — модуль сдвига,  $S$  и  $D$  — площадь дислокации и смещение по разлому, и через  $S$  и  $D$  связан с сейсмостектоническим деформированием горных пород. Он использовался нами при оценке энергии сейсмостектонических деформаций литосферы Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) для более надежного и обоснованного подхода к решению проблем обеспечения сейсмической безопасности в Байкальском регионе [2]. В настоящей работе рассматривается сейсмичность Монголии ( $\varphi = 42^\circ\text{--}54^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 87^\circ\text{--}120^\circ$  в.д.), представленная землетрясениями с магнитудой  $M \geq 3$ , происшедшими за период инструментальных наблюдений (1964–2008 гг.), и сейсмичность исторического периода, представленная землетрясениями с магнитудой  $M \geq 6$  в электронном “Каталоге землетрясений Монголии” (1740–1963 гг.). Как видно из каталога, в период инструментальных наблюдений такие землетрясения регистрировались без пропусков, а ошибки в определении координат эпицентров толчков не превышают 20 км. Можно полагать, что в исторический период часть землетрясений с  $M \geq 6$  была пропущена и не внесена в “Каталог землетрясений Монголии”, а погрешность в определении координат эпицентров некоторых событий может достигать единиц градуса. Такие неопределенности послужили причиной разделения исследуемой сейсмичности на два периода (инструментальный и исторический) и использования осреднения дан-

Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск

Исследовательский центр по астрономии и геофизике  
Монгольской академии наук, Улан-Батор

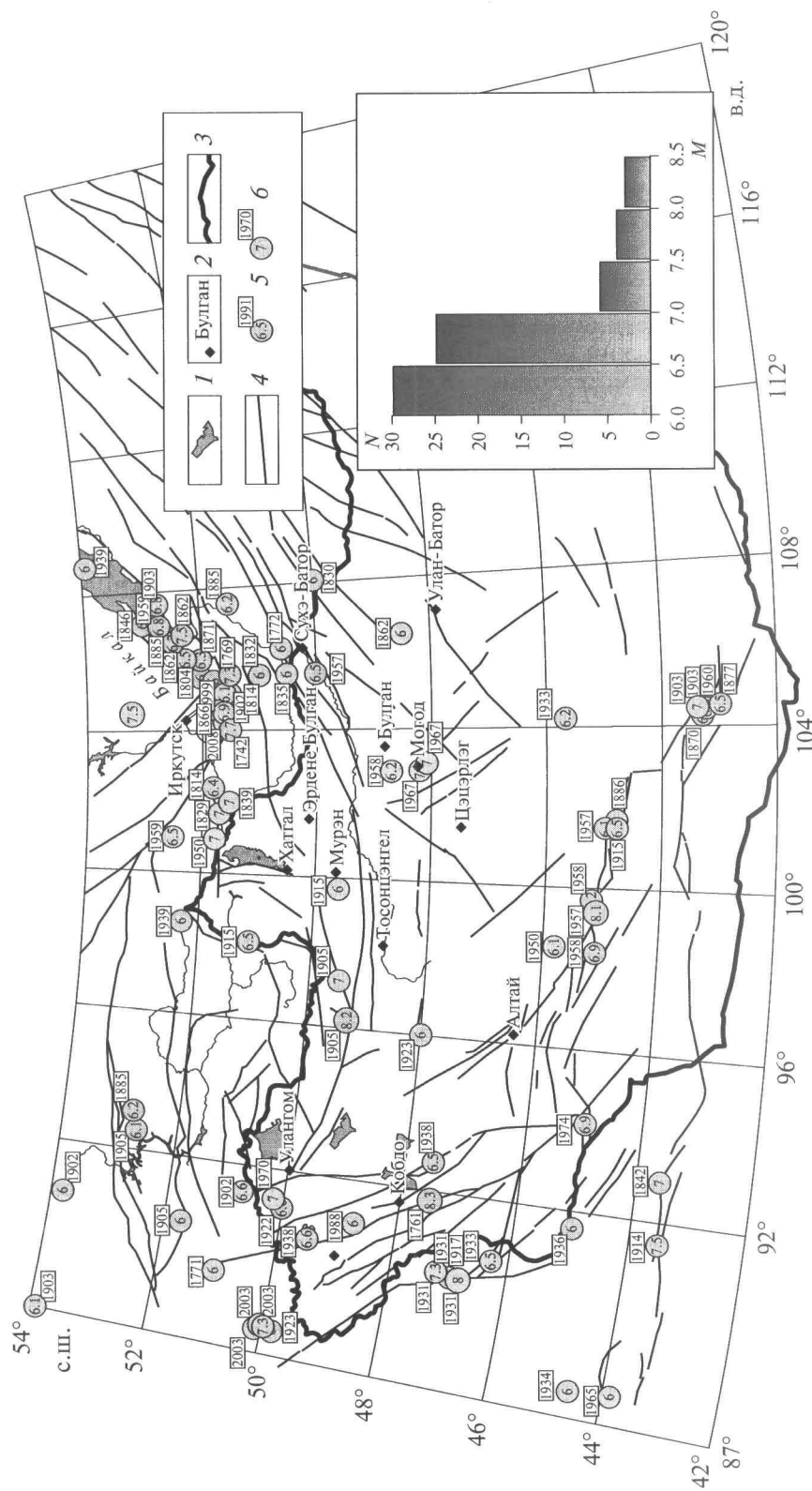


Рис.1. Карта эпицентров и гистограмма распределения (врезка) по магнитуде сильных землетрясений Монголии за инструментально-исторический период (1740–2008 гг.). 1 – озера, 2 – районы, 3 – границы России и Монголии, 4 – основные разломы, 5 и 6 – эпицентры землетрясений с  $6.0 \leq M \leq 6.9$  и  $M \geq 7.0$  соответственно.

ных при построении карт по крупным площадкам размером  $200 \times 200 \text{ км}^2$  с перекрытием в половину площадки. В целом анализируется интервал времени более 260 лет, а рекуррентные интервалы сильнейших землетрясений в Монголии составляют около 200 лет [6].

Для перехода от магнитуд к сейсмическому моменту, характеризующему работу и энергию сейсмостектонических деформаций, используется корреляционное уравнение, установленное по данным о сильных землетрясениях мира [4]:

$$\lg M_0 \pm 0.6 = 8.4 + 1.6M. \quad (2)$$

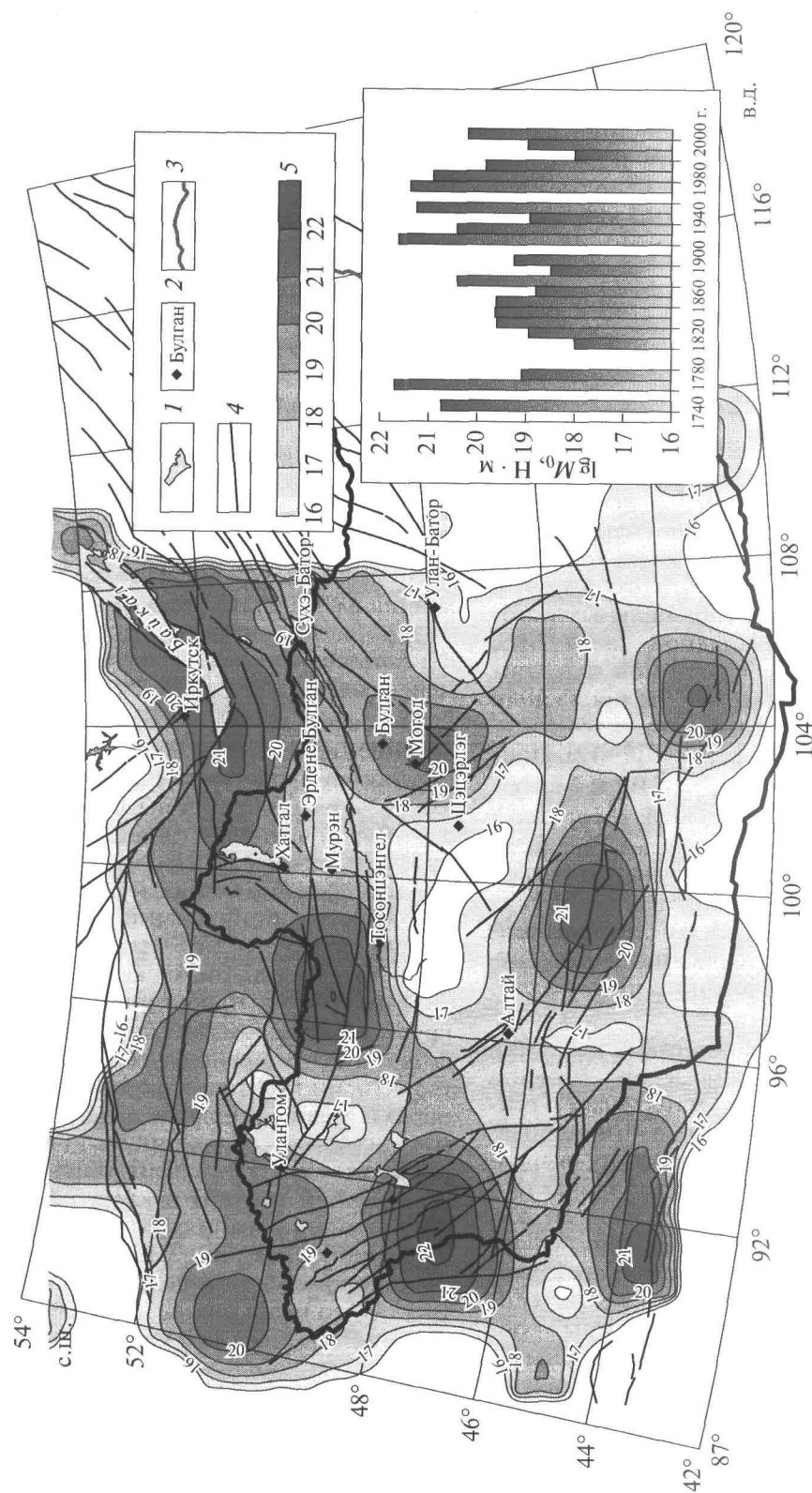
В площадках размером  $200 \times 200 \text{ км}^2$  определены максимальные значения магнитуд землетрясений, которые по формуле (2) пересчитаны в величины сейсмического момента в единицах ньютон на метр ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ , работа), эквивалентных джоулю (Дж, энергия).

На карте (рис. 1) наблюдается довольно равномерное распределение эпицентров сильных сейсмических событий Монголии вдоль системы разломов Гобийского и Монгольского Алтая, а также концентрация эпицентров сильных исторических толчков в юго-западной части БРЗ. Вдоль Болнайской системы разломов и в центральной части Монголии в XX в. произошли сильнейшие континентальные землетрясения — Болнайское (23.07.1905,  $M = 8.2$ ,  $I_0 = 11-12$ ), Цэцэрлэгское (09.07.1905,  $M = 7.6$ ,  $I_0 = 10$ ) и Могодское (05.01.1967,  $M = 7.8$ ,  $I_0 = 10-11$ ). На врезке к рис. 1 приведена гистограмма распределения чисел сильных землетрясений по магнитуде, указывающая на неполную представительность исторических толчков с магнитудами от 6 до 6.5. В целом наблюдаемое на рис. 1 распределение толчков свидетельствует о высочайшем сейсмическом потенциале литосферы региона.

На рис. 2 представлена карта-схема изолиний логарифма суммарного сейсмического момента землетрясений, построенная по материалам о сейсмических событиях инструментально-исторического периода. Она характеризует работу, выполненную в результате землетрясений, и в рамках теории последствий интерпретируется нами как карта-схема энергии сейсмостектонических деформаций литосферы Монголии. Анализ карты указывает на неоднородность распределения сейсмостектонических деформаций литосферы — области максимальной энергии приурочены к крупным разломным зонам и узлам, генерирующим землетрясения максимальной магнитуды. На рис. 2 повышенным уровнем энергии сейсмостектонических деформаций выделяется система разломных структур, окружающих Долину Озер. Максимальный уровень  $\lg M_0 \approx 22$  соответствует очагу катастрофического Монгольского землетрясения ( $M = 8.3$ , 1761 г.) на западе Монголии.

Несколько меньше уровень энергии сейсмостектонических деформаций при катастрофическом Болнайском ( $M = 8.2$ , 1905 г.,  $\lg M_0 \approx 21.9$ ), Монголо-Алтайском ( $M = 8.0$ , 1931 г.,  $\lg M_0 \approx 21.2$ ) и Гоби-Алтайском ( $M = 8.1$ , 1957 г.,  $\lg M_0 \approx 21.4$ ) землетрясениях. В очаге Могодского землетрясения ( $M = 7.8$ , 1967)  $\lg M_0 \approx 20.8$ . В менее значительных максимумах  $\lg M_0 \approx 18-19$ , а территория повышенного уровня энергии сейсмостектонических деформаций выделяется изолинией  $\lg M_0 \approx 16$ . Распределение сейсмостектонической энергии во времени характеризуется гистограммой логарифма суммарного значения сейсмических моментов землетрясений, происшедших в регионе с 1740 г. за интервалы времени в 10 лет (рис. 2, врезка). Наблюдаемый на гистограмме высокий уровень логарифма суммарного сейсмического момента совпадает во времени с наиболее сильными землетрясениями, указывая на то, что сбросы сейсмостектонической энергии свыше  $10^{20}$  Дж происходили в результате сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.5$ , и относительно этих величин доля выделенной энергии менее значительными толчками невелика.

В современном представлении разломообразование и землетрясения являются разномасштабными свойствами одной динамической системы — разломной зоны [7]. Между разломной структурой и эпицентральной полем землетрясений установлена связь, используемая в линейно-доменно-фокальной модели общего сейсмического районирования территорий [8, 9]. Так как наиболее сильные землетрясения генерируются литосферными блоками высшего иерархического уровня, то обусловленность их наиболее крупными разломами постулируется. В таком случае главные сейсмически активные разломы территории Монголии формируют доминантный образ и задают основные параметры карты общего сейсмического районирования [10]. Если сопоставить карту энергии сейсмостектонических деформаций (рис. 2) и карту общего сейсмического районирования Монголии [10], то видно, что в конфигурации изолиний на этих картах прослеживается определенное сходство. Следует учесть, что карта общего сейсмического районирования получена для системы однородных разломов, а на карте энергии сейсмостектонических деформаций отражена реальная картина фрактального неоднородного разломообразования. Так и должно быть, если рассматривать разломы как источники землетрясений и учитывать масштабную связь размеров разломов и магнитуды землетрясений. Мы попытались установить эту связь путем корреляции интенсивности сейсмических сотрясений ( $I_0$ , балл) с энергией сейсмо-



**Рис.2.** Карта-схема изолиний логарифма энергии сейсмотектонических деформаций литосферы Монголии и гистограмма распределения (врезка) логарифма энергии во времени. 1 – озера, 2 – аймаки, 3 – граница России и Монголии, 4 – основные разломы, 5 – шкала логарифма энергии сейсмотектонических деформаций.

тектонических деформаций ( $\lg M_0$ ), снятых в соответствующих точках сопоставляемых карт. Уравнения прямой и обратной линейной корреляции получены в следующем виде:

$$I_0 = 0.9 \lg M_0 - 7.3, \quad \rho = 0.75, \quad (3)$$

$$\lg M_0 = 0.6 I_0 + 11.8. \quad (4)$$

В настоящее время перед проектировщиками и строителями чрезвычайно остро стоит вопрос об уточнении исходной балльности территории г. Улан-Батор — столицы Монголии. Это связано как с установленной активизацией сейсмичности в районе города [11], так и со строительством высотных зданий и сооружений [12]. Если применить формулу (3) к расчету интенсивности сейсмических сотрясений в районе города, то при  $\lg M_0 \approx 17$  (см. рис. 2) полученное значение составит  $I_0 \approx 8.0$  балла, что хорошо соответствует значению исходной балльности на карте общего сейсмического районирования [10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (09–05–00014\_a, 08–05–90201–Монг\_a) и НОЦ “Байкал”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baljinnyam I., Bayasgalan A., Borisov B.A., et al. Ruptures of Major Earthquakes and Active Deformation in Mongolia and its Surroundings // *Mem. Geol. Soc. Amer.* 1993. V. 181. 59 p.
2. Ключевский А.В., Демьянович В.М. // *ДАН.* 2009. Т. 428. № 5. С. 663–666.
3. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Джурик В.И. // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2007. № 5. С. 33–36.
4. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент/ Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
5. Голицын Г.С. Вычислительная сейсмология. М.: Геос, 2001. В. 32. С. 139–161.
6. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Баяраа Г. // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 7. С. 746–762.
7. Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. 470 p.
8. Уломов В.И. В кн.: Сейсмические опасности (Природные опасности России). М.: КРУК, 2000. С. 66–96.
9. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: НИТ РФ; ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
10. Демьянович М.Г., Ключевский А.В., Демьянович В.М. // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2008. № 2. С. 74–76.
11. Schlupp A., Ulziibat M., Ankhtsetseg D., et al. In: Conf. Commemorating the 50<sup>th</sup> Anniversary of the 1957 Gobi-Altay Earthquake. Ulaanbaatar, 2007. P. 210–215.
12. Джурик В.И., Серебренников С.П., Ключевский А.В., Батсайхан Ц. // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2009. № 5. С. 46–51.