

**ОЦЕНКА РЕКУРРЕНТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ И ВЕРОЯТНОСТИ СИЛЬНЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ И МОНГОЛИИ**

**А.В. Ключевский, В.М. Демьянович, Г. Баяр\***

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
\* Исследовательский центр по астрономии и геофизике МАН, Улан-Батор, Монголия*

Оценка рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона, трех входящих в него районов и Монголии выполнена в рамках модели неоднородного разлома при использовании принципа максимума энтропии и распределения Пуассона. Если величину максимально возможного энергетического класса характеристических землетрясений принять равной  $K_p = 19$ , то рекуррентные интервалы сильных землетрясений с  $K_p = 18$  составят 220 лет для Байкальского региона, 370, 470 и 430 лет для юго-западного, центрального и северо-восточного районов и 210 лет для Монголии. При  $K_p = 19$  в пределах этих территорий величины энергетического класса землетрясений с 10 %-й вероятностью реализации в течение 50 лет равны ( $K_p$ ): 18,39; 18,15; 18,00; 18,06 и 18,42; вероятности землетрясений с  $K_p = 18,0$  в течение 50 лет составляют ( $P$ ): 0,20; 0,13; 0,10; 0,11 и 0,21 соответственно.

*Сильные землетрясения, энергетический класс, магнитуда, рекуррентный интервал, вероятность, Байкальский регион, Монголия.*

**LARGE EARTHQUAKES IN THE BAIKAL REGION AND MONGOLIA:  
RECURRENCE TIME AND PROBABILITY**

**A.V. Klyuchevsky, V.M. Dem'yanovich, and G. Bayar**

Recurrence time and probability for large earthquakes in the Baikal region and Mongolia were estimated within the limits of a nonuniform fault model using the principle of entropy maximum and Poisson's distribution. The predicted recurrence times of  $K_p = 18$  earthquakes are 220 years for the Baikal region, 370, 470, and 430 years for the southwestern, central, and northeastern regions, respectively, and 210 years for Mongolia, if the maximum energy of characteristic events is taken as  $K_p = 19$ . At  $K_p = 19$ , the events that may occur in the future 50 years within these territories to a 10% probability are expected to release the energies of 18.39, 18.15, 18.00, 18.06, and 18.42; the estimated probabilities ( $P$ ) for  $K_p = 18.0$  events to occur within 50 years are 0.20, 0.13, 0.10, 0.11, and 0.21, respectively.

*Large earthquakes, energy class, magnitude, recurrence time, probability, Baikal region, Mongolia*

**ВВЕДЕНИЕ**

Новейшие исследования по общему сейсмическому районированию территории Российской Федерации показали, что более 15 % общей площади страны занимают чрезвычайно опасные в сейсмическом отношении 8—10-балльные зоны, требующие проведения обязательных антисейсмических мероприятий [1]. Байкальский регион ( $\varphi = 48—60^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 96—122^\circ$  в.д.), расположенный в юго-восточной части страны на границе с Монголией, входит в число таких территорий. Наиболее опасной в сейсмическом отношении является Байкальская рифтовая зона (БРЗ), протягивающаяся системой впадин от Северной Монголии вдоль оз. Байкал к Южной Якутии [2]. Для Прибайкалья землетрясения с магнитудой  $M > 6,0$  ( $K_p > 15$ ) классифицируются как опасные, способные повлечь за собой значительные человеческие жертвы и материальный ущерб [3]. Одно из последних землетрясений с магнитудой  $M_w = 6,1$  произошло 25 февраля 1999 г. в южной части оз. Байкал и ощущалось в Иркутске силой 5—6 баллов.

Проведенные сейсмические, сейсмологические и региональные комплексные исследования свидетельствуют, что структурные геологические формы и геодинамические процессы, в том числе и современные движения литосферы, обусловлены эндогенными преобразованиями в глубинных слоях Земли [4]. Подобные исследования указывают на обусловленность сейсмических событий неоднородным строением литосферы и разномасштабными геодинамическими явлениями различной природы, вызвавшими

изменения напряженно-деформированного или реологического состояния среды. Анализ наблюдаемой сейсмичности обычно не позволяет выделить воздействие отдельного фактора на сейсмичность, поскольку она одновременно испытывает влияние многих факторов, среди которых могут оказаться более сильные, чем исследуемый. Хотя пока не существует адекватной теории сейсмического процесса, но на основе имеющихся данных можно предположить, что различные свойства литосферы (пространственная неоднородность, иерархическая блоковая структура, различные типы нелинейной реологии, гравитационные процессы, физико-химические и фазовые переходы, миграции флюидов) проявляются в свойствах потоков землетрясений. Устойчивость этих свойств в разных регионах позволяет сделать вывод о том, что можно моделировать литосферу как диссипативную систему, поведение которой существенно не зависит от частных деталей конкретных процессов в литосфере, и методы общего сейсмического районирования могут быть применимы в различных сейсмоактивных регионах.

Рабочей группой по исследованию сильных землетрясений Южной Калифорнии разработана „каскадная мультисегментная модель“ [5], которая предполагает сложное неоднородное строение разломов [6] и распределение землетрясений в пространстве и времени по закону Гутенберга—Рихтера. Магнитуда и рекуррентное время сильных сейсмических событий оцениваются на основе гипотезы характеристического землетрясения, в соответствии с которой подвижки по разлому осуществляются характеристическими толчками, полностью разрывающими сегменты разлома с постоянным характеристическим смещением  $D$ , а разлом может быть разделен на сегменты, каждому из которых приписывается характеристическая магнитуда. Предполагается, что границы сегментов проходят там, где разломы меняют направление. Сейсмическая опасность определяется числом характеристических землетрясений, скоростью потока всех сейсмических событий и характеристической магнитудой, величина которой вычисляется из данных о длинах сегментов разлома, а скорость потока толчков — из наблюдаемой сейсмичности и сейсмического момента разлома. Некоторые положения этой модели были применены нами для оценки рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Южного Прибайкалья [7]. Было показано, что вероятность землетрясений с энергетическим классом  $K_p = 16$  в течение 50 лет равна  $P = 0,34$  и достаточно высока, чтобы считать реальной возможность такого толчка в сейсмоактивных зонах Южного Прибайкалья. Затем с учетом сейсмических моментов землетрясений выполнен модельный расчет смещений скального грунта в городах юга Восточной Сибири. Установлено, что сильные толчки из зоны Главного Саянского разлома представляют наибольшую сейсмическую опасность для этих городов из-за взбросового типа подвижки по разлому.

Известно, что уровень вероятности и интервал повторяемости сильных землетрясений являются основными параметрами при составлении карт общего сейсмического районирования [1]. В настоящей работе представлены результаты расчетов рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона, трех входящих в него районов и Монголии, полученные в рамках гипотезы характеристических землетрясений. Из-за слабой изученности разломных зон Байкальского региона и Монголии и неопределенности величины максимально возможной магнитуды землетрясения расчеты выполнены для набора характеристических магнитуд. Предполагается, что землетрясения с такими магнитудами могут быть реализованы на разломах в различных частях регионов [8]. При вычислении рекуррентных интервалов сильных землетрясений использован метод, основанный на принципе максимума энтропии [9], а оценки вероятности сильных землетрясений были получены в предположении, что распределение сейсмических толчков соответствует закону Пуассона [10, 11]. Распределение землетрясений в пространстве и времени описывается соответствующими графиками повторяемости толчков. Разделение территории Байкальского региона на три района выполнено с целью исследования влияния масштабирования при сейсмическом районировании на рекуррентные интервалы и вероятность сильных землетрясений. Байкальский регион и Монголия сопоставлены как территории, характеризующиеся различными геологическими формами и геодинамическими процессами. Известно, что на значительной части БРЗ в условиях рифтогенеза преобладают растягивающие напряжения, ориентированные вкрест простирания основных морфоструктур [12—14]. Доминирующим фактором деформационного процесса в Байкальском регионе является его обусловленность, по крайней мере, двумя основными энергетическими источниками [2, 15] — коллизией Индии и Евразии [16, 17] и подъемом с растеканием мантийного диапира [18, 19]. В Монголии преобладающим типом активного разломообразования является сдвиг, правосторонний по плоскостям, ориентированным от севера до северо-запада, и левосторонний по разломам, направленным на запад или запад-северо-запад [20]. Довольно однородное поле напряжений может быть представлено северо-восток-юго-западным сжатием и северо-запад-юго-восточным растяжением [21]. В рамках теории литосферных плит направленность сжатия объясняется схождением Индии с Евразией.

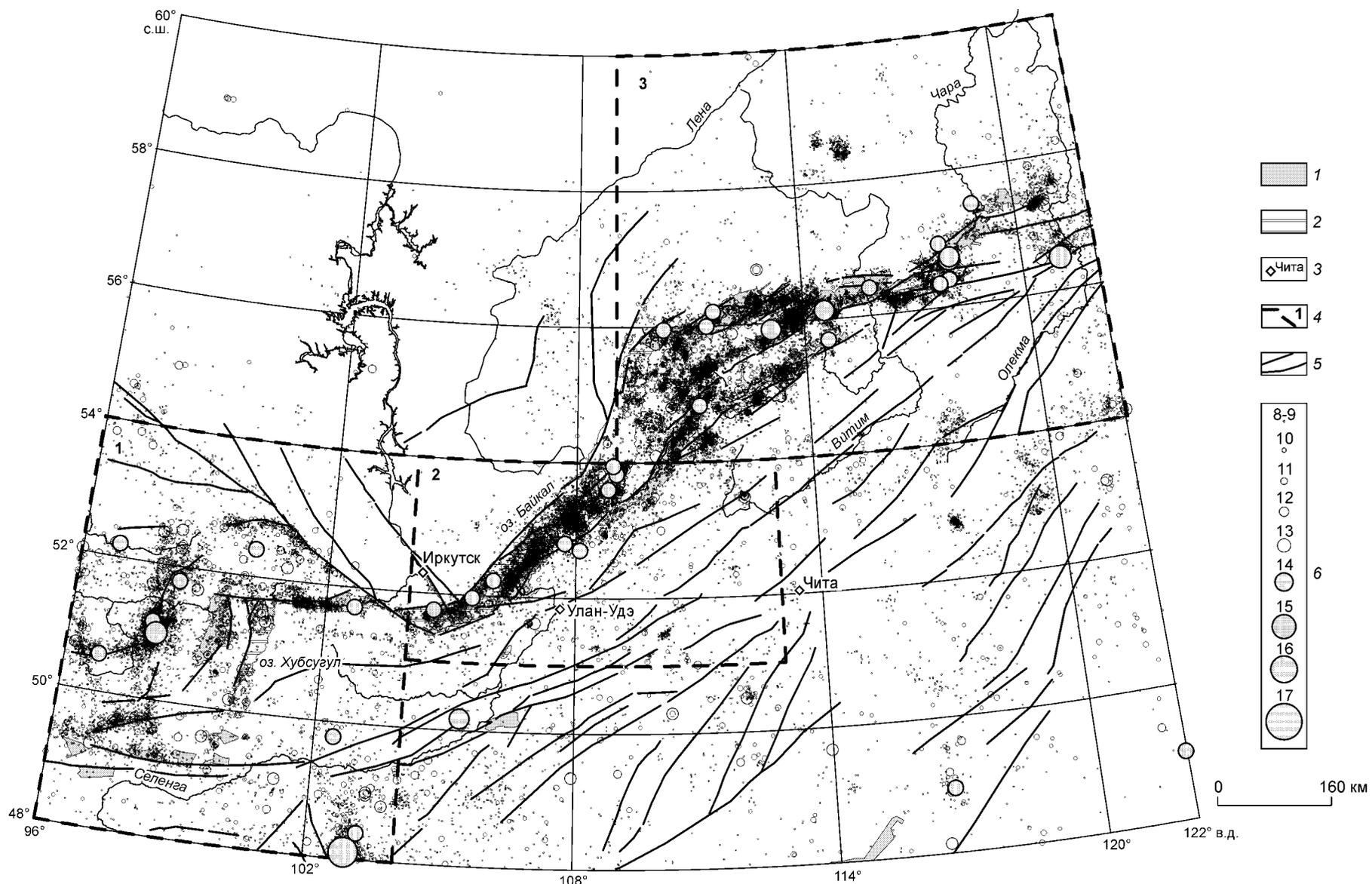
Информацию о максимальных сейсмических толчках, произошедших на территории Байкальского региона, можно получить в каталоге, составленном по макросейсмическим и инструментальным данным [22], в частности из раздела о сильных землетрясениях Прибайкалья, а также из „Каталога землетрясений Прибайкалья“. В этих источниках приведены сведения о нескольких землетрясениях региона, магнитуды которых имели средние значения  $M \approx 8$ . Это Большое Южно-Байкальское ( $M = 7,7 \pm 0,7$ , июнь

1742 г., Южный Байкал), Цаганское ( $M = 7,5 \pm 0,4$ , январь 1862 г.,  $\varphi = 52,3^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 106,7^\circ$  в.д.), Муйское ( $M = 7,6 \pm 0,3$ , июнь 1957 г.,  $\varphi = 56,2^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 116,4^\circ$  в.д.) и Могодское ( $M = 7,8 \pm 0,2$ , январь 1967 г.,  $\varphi = 48,1^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 102,9^\circ$  в.д.) землетрясения. Цаганское землетрясение сопровождалось серией сильных форшоков и многочисленных афтершоков [23]. В результате землетрясения в районе дельты Селенги был сформирован обширный зал. Провал площадью свыше 200 км<sup>2</sup>. Интенсивность сотрясений в Иркутске при Цаганском землетрясении достигала 7—8 баллов [24]. Муйское землетрясение произошло в Становом нагорье на глубине около 22 км [25]. В процессе этого катастрофического землетрясения вдоль северных предгорий хр. Удокан образовалась система поверхностных разрывов длиной до 25 км. Могодское землетрясение произошло в Центральной Монголии в междуречье Орхон—Тола и сопровождалось серией сильных афтершоков. Сейсмогенные разрывы, возникшие при этом землетрясении, составили непрерывную систему сейсмодислокаций общей протяженностью 45 км [26]. В Иркутске (на расстоянии 470 км от эпицентра Могодского землетрясения) интенсивность сотрясений достигала 7 баллов [24]. Следует особо отметить катастрофическое Болнайское землетрясение ( $M = 8,2$ , июль 1905 г.,  $\varphi = 49,3^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 96,2^\circ$  в.д.), при котором обновление зоны Северо-Хангайского разлома (Северная Монголия) наблюдалось на протяжении 370 км [26]. В Иркутске на расстоянии порядка 650 км сила сейсмических сотрясений доходила до 6 баллов [24]. На основании этих оценок с достаточной степенью уверенности можно считать, что в пределах юго-западного и северо-восточного флангов и в центральной части Байкальского региона происходили сейсмические толчки с магнитудой  $M \approx 8$ , а магнитуда максимально возможного землетрясения в регионе может достичь  $M_{\max} \approx 8,5$ .

Значительная часть территории Монголии расположена в высокосейсмичных областях Центрально-Азиатского сейсмического пояса и подвержена частым и сильным землетрясениям. Отдельные регионы Монголии испытывают быстрые деформации, происходящие частично в ответ на коллизию Индостана и остальной части Евразийского континента [16], но особенно опасна в сейсмическом отношении западная половина её территории. Только в XX веке на территории Монголии произошло более 70 землетрясений с  $M > 5,5$  (интенсивностью от 7 до 11—12 баллов). Среди них десятки землетрясений вызвали крупные нарушения земной поверхности, а сейсмические катастрофы 1905, 1931 и 1957 гг. (Болнайское, Монголо-Алтайское и Гоби-Алтайское землетрясения) сопровождалось сейсмотектоническими деформациями протяженностью до сотен километров [20, 26, 27]. Монголо-Алтайское землетрясение ( $M = 8$ , август 1931 г.,  $\varphi = 46,9^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 90,0^\circ$  в.д.) произошло в провинции Синьцзян на юго-западной границе Монголии и Китая. Главный разрыв протянулся на 180 км вдоль юго-западного склона Монгольского Алтая. При Гоби-Алтайском землетрясении ( $M = 8,1$ , декабрь 1957 г.,  $\varphi = 45,31^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 99,21^\circ$  в.д.) на юге Монголии произошло обновление и образование целой системы разломов и сейсмодислокаций на протяжении не менее 270 км. В Иркутске на расстоянии около 900 км от эпицентра сила сейсмических сотрясений составляла 5 баллов [24]. Судя по сохранившимся следам древних землетрясений и летописным сведениям, подобные и, возможно, более грандиозные сейсмические события происходили на территории Монголии в исторически недавнем прошлом [27]. Поэтому вполне естественно предположить, что магнитуда максимально возможного землетрясения Монголии может достигать  $M_{\max} \approx 8,5$ .

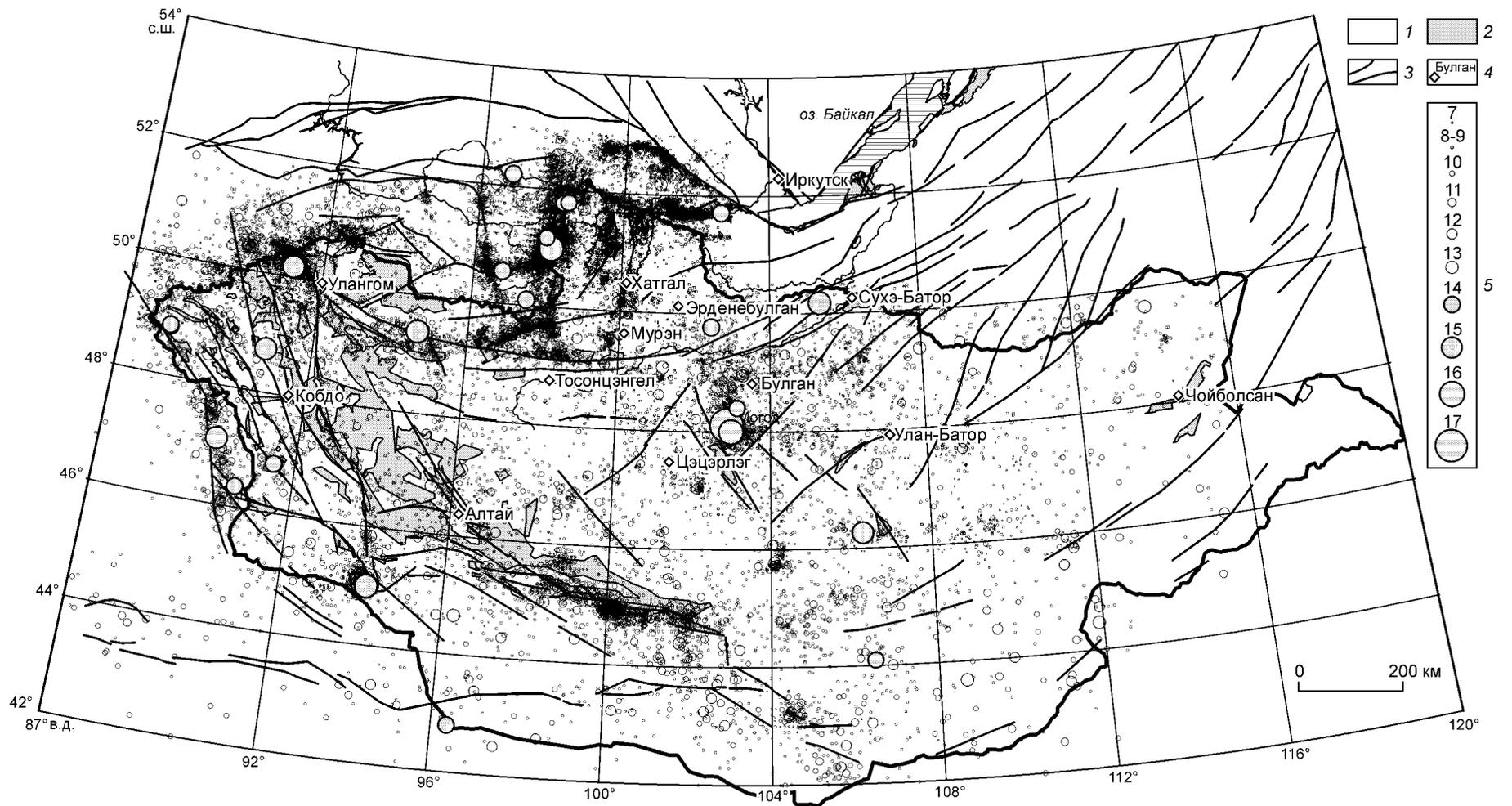
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Вычисление рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений выполнено для Байкальского региона, трех входящих в него районов и Монголии. Карты эпицентров землетрясений Байкальского региона и Монголии, полученные по данным региональных каталогов землетрясений Прибайкалья и Монголии за 1960—1998 и 1964—1999 гг. соответственно, приведены на рис. 1 и 2. Энергетические классы  $K_p$  землетрясений Прибайкалья и Монголии определены по номограмме Т.Г. Раутиан [28]. На карте Байкальского региона (см. рис. 1) представлены данные инструментальных наблюдений с 1960 по 1998 г. ( $n = 38446$ ), когда в БРЗ без существенных пропусков регистрировались толчки с  $K_p \geq 8$  [29], и приведена схема регионализации, в соответствии с которой территория региона разделена на юго-западный (1,  $\varphi = 48—54^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 96—104^\circ$  в.д.), центральный (2,  $\varphi = 51—54^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 104—113^\circ$  в.д.) и северо-восточный (3,  $\varphi = 54—60^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 109—122^\circ$  в.д.) районы. За период инструментальных наблюдений 1964—1999 гг. представительный энергетический класс землетрясений Монголии оценен  $K_p = 9$ , однако в конце 1980-х годов толчки такого класса регистрировались не полностью [30]. Чтобы показать детали пространственного распределения эпицентров землетрясений по территории Монголии, приведены эпицентры 38 003 толчков с  $K_p \geq 7$  (см. рис. 2). На картах выделяются полосы повышенной плотности эпицентров землетрясений, чаще всего согласующиеся с зонами разломов. В некоторых местах участки повышенной концентрации эпицентров имеют вид компактных плотных „пятен“, которые могут совпадать с зонами пересечения разломов или локализоваться без какой-либо пространственной при-



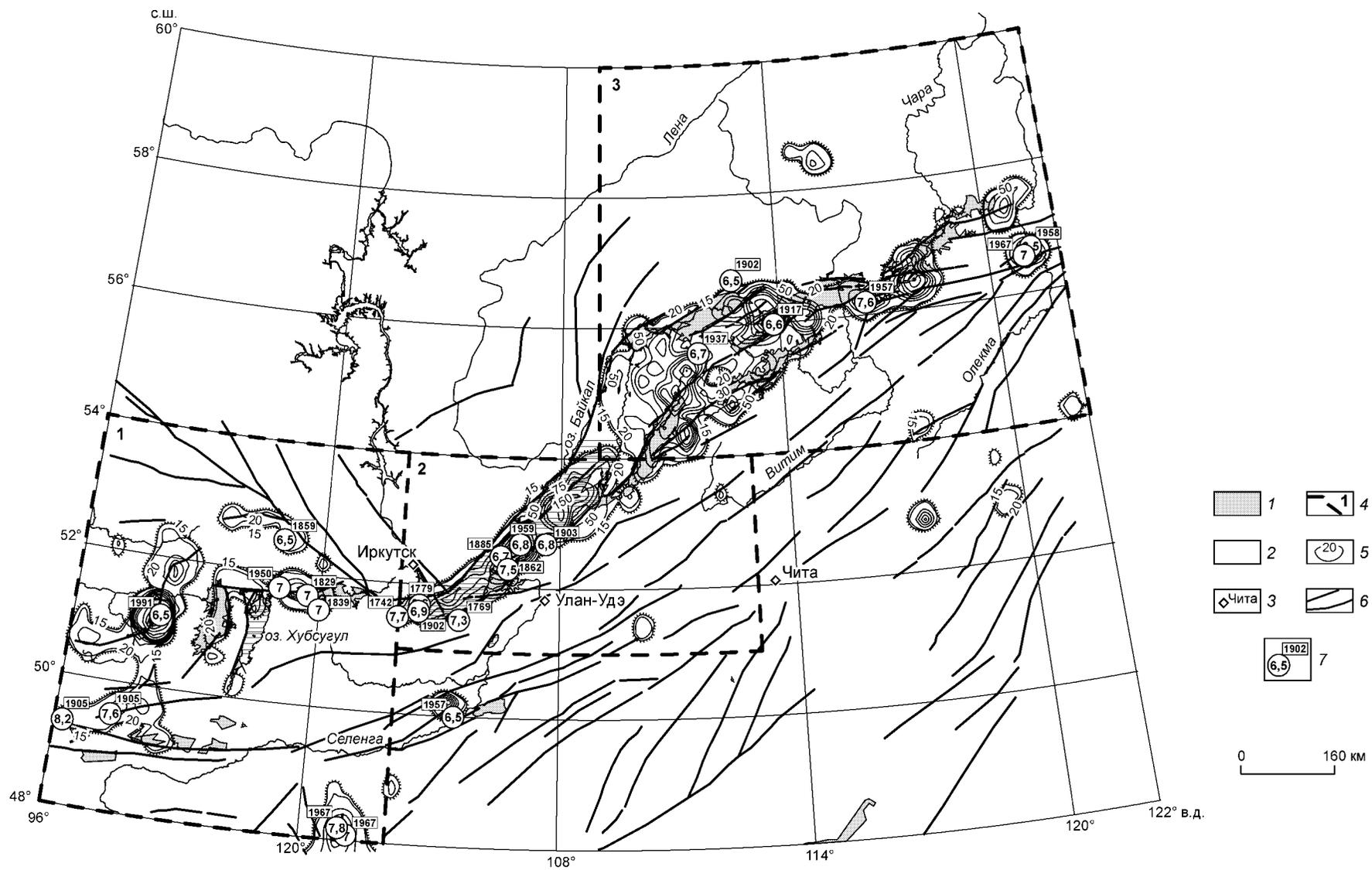
**Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Байкальского региона и схема деления на три района.**

1 — впадины, 2 — озера, 3 — города, 4 — границы и номера районов, 5 — разломы, 6 — эпицентры землетрясений с энергетическим классом  $K_p \geq 8$ .



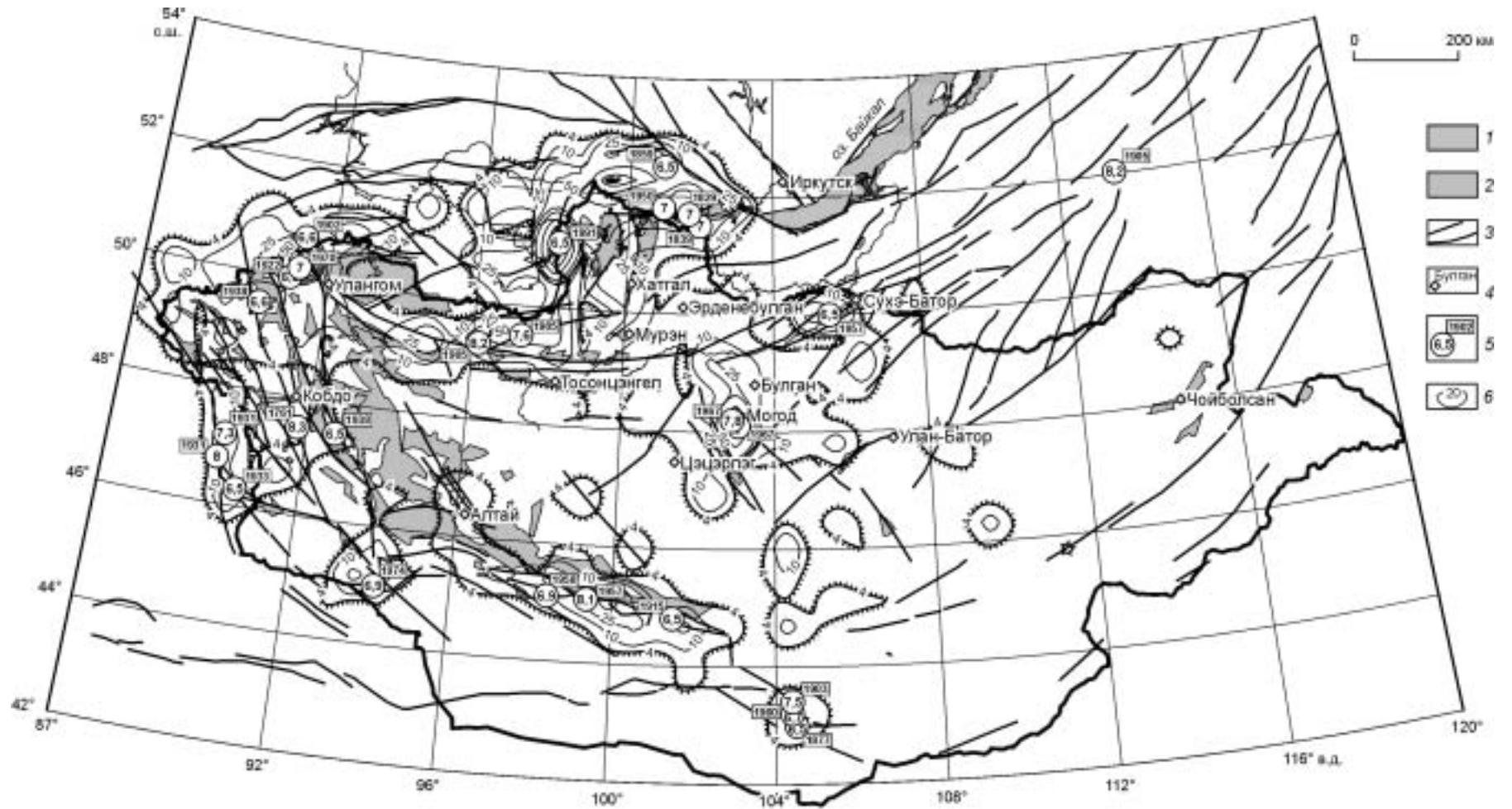
**Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Монголии.**

1 — озера, 2 — впадины, 3 — разломы, 4 — аймаки, 5 — эпицентры землетрясений с энергетическим классом  $K_p \geq 7$ .



**Рис. 3. Карта плотности эпицентров землетрясений Байкальского региона.**

1 — впадины, 2 — озера, 3 — города, 4 — границы и номера районов, 5 — изолинии плотности эпицентров землетрясений (нижний предел шкалы изолиний  $N = 15$  выделен бергштрихами, которые направлены в сторону уменьшения плотности эпицентров толчков), 6 — разломы, 7 — эпицентры (магнитуда и год) сильных исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений Байкальского региона с магнитудой  $M \geq 6,5$ .



**Рис. 4.** Карта плотности эпицентров землетрясений Монголии.

1 — озера, 2 — впадины, 3 — разломы, 4 — аймаки, 5 — эпицентры (магнитуда и год) сильных исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,5$ , 6 — изолинии плотности эпицентров землетрясений (нижний предел шкалы изолиний  $N = 4$  выделен бергштрихами, которые направлены в сторону уменьшения плотности эпицентров толчков).

уроченности к известным деструктивным элементам земной коры. Как правило, области высокой концентрации эпицентров соответствуют афтершокам сильных землетрясений второй половины прошедшего столетия и группам роевых толчков. Достаточно отчетливо прослеживается связь сильных землетрясений и высокой плотности эпицентров в районе Бусийнгольской впадины Прихубсугуля. За период инструментальных наблюдений здесь были зарегистрированы два землетрясения с  $K_p = 14$  (29.11.1974,  $\varphi = 51,79^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 98,47^\circ$  в.д. и 01.04.1976,  $\varphi = 51,15^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 97,97^\circ$  в.д.) и одно с  $K_p = 16,2$  (27.12.1991,  $M_{LH} = 6,5$ ;  $\varphi = 51,12^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 98,15^\circ$  в.д.), сопровождавшиеся продолжительными сериями афтершоков. Аналогичная ситуация имела место в районе Могодского и Северо-Монгольского (Бутэлийнского) (13.05.1989;  $\varphi = 50,17^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 105,34^\circ$  в.д.;  $M_{LH} = 5,8$ ;  $K_p = 15$ ) землетрясений.

Приведены (рис. 3, 4) карты плотности эпицентров землетрясений Байкальского региона и Монголии, полученные путем суммирования землетрясений (см. рис. 1, 2) в площадках размером  $0,2 \times 0,3^\circ$ . Дискретизация шкалы изолиний землетрясений Байкальского региона соответствует 15-20-50-75-100-125-150-200-250-500-750-1000, а для землетрясений Монголии составляет 4-10-25-50-100-250-500-750-1000 толчков в площадке. Нижние пределы шкалы изолиний ( $N = 15$  и 4) для лучшего восприятия выделены бергштрихами, которые направлены в сторону уменьшения плотности эпицентров толчков. На картах выделяются локальные максимумы плотности эпицентров, превышающие величину  $N > 50$ . Максимальная плотность эпицентров  $N \approx 1200$  наблюдается на севере Монголии в зоне афтершоков Бусийнгольского землетрясения 1991 г. На этих же рисунках показаны эпицентры сильных исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений Байкальского региона и Монголии с  $M \geq 6,5$ .

Для вычисления рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона были использованы представительные сейсмические события с энергетическим классом  $K_p \geq 10$  и магнитудой  $M_{LH} \geq 3,5$ , зарегистрированные региональной сетью сейсмических станций с 1960 по 1991 г. Афтершоки и роевые толчки были исключены из массива используемых данных. Основные сведения о координатах, размерах площадок и продолжительности действия группирующихся событий взяты из [31] и дополнены материалами за последующие годы [32]. При вычислении рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Монголии были использованы сейсмические события с энергетическим классом  $K_p \geq 10$ , зарегистрированные с 1964 по 1997 г. в пределах территории с координатами  $\varphi = 42—52^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 87—120^\circ$  в.д. Афтершоки Могодского и Бусийнгольских землетрясений были исключены из массива используемых данных. Расчеты рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений по данным шкалы магнитуд выполнены для землетрясений с  $M_{LH} \geq 4$ , зарегистрированных в пределах этого же региона с 1960 по 1991 г. [33]. Магнитуды землетрясений, чаще всего, определены по наблюдениям на телесеизмических расстояниях. При отсутствии прямых определений магнитуды по инструментальным данным она оценивалась путем пересчета из энергетического класса [34].

При вычислении рекуррентных интервалов сильных землетрясений был использован метод, основанный на принципе максимума энтропии [9]. Функция плотности вероятности  $f(M)$  магнитуды  $M$ , ограниченной в пределах  $M_{\min} \leq M \leq M_{\max}$ , может быть представлена в виде

$$f(M) = \lambda \exp(-\lambda/M) [\exp(-\lambda M_{\min}) - \exp(-\lambda M_{\max})], \quad (1)$$

где  $M_{\max}$  — магнитуда максимально возможного землетрясения в исследуемом регионе,  $M_{\min}$  — магнитуда минимальных толчков, используемых в расчетах, а параметр  $\lambda$  вычисляется численно из формулы

$$1/\lambda + [M_{\min} \exp(-\lambda M_{\min}) - M_{\max} \exp(-\lambda M_{\max})] / [\exp(-\lambda M_{\min}) - \exp(-\lambda M_{\max})] = M_{av}, \quad (2)$$

в которой  $M_{av}$  — среднее значение магнитуды всего массива данных.

Распределение числа землетрясений по магнитуде можно получить, проинтегрировав выражение (1) по  $M$  в пределах от  $M$  до  $M_{\max}$  [35] и представив в виде

$$N(M) = N(M_{\min}) [\exp(-\lambda M) - \exp(-\lambda M_{\max})] / [\exp(-\lambda M_{\min}) - \exp(-\lambda M_{\max})]. \quad (3)$$

Здесь  $N(M)$  — число землетрясений с магнитудой, превышающей  $M$ ,  $N(M_{\min})$  — число толчков с магнитудой, равной или большей  $M_{\min}$ , произошедших в интервал времени  $T$ .

Очевидно, следуя [9, 35] и применяя принцип максимальной энтропии к распределению землетрясений по энергетическим классам, можно получить формулы, аналогичные (1—3) с заменой магнитуд на соответствующие энергетические классы. Для более полной и надежной характеристики сейсмического режима расчеты рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона и Монголии выполнены при использовании шкалы магнитуд и шкалы энергетических классов. Оценки вероятности сильных землетрясений были получены в предположении, что распределение сейсмических

толчков соответствует закону Пуассона [10, 11]. Процесс Пуассона широко используется при моделировании временных последовательностей землетрясений [1, 5, 36, 37]. В соответствии с этим распределением, вероятность  $P$  того, что за время  $t$  произойдет одно или больше землетрясений с магнитудой, превышающей  $M$ , равна [35]

$$P = 1 - \exp(-t \times N(M)), \quad (4)$$

где  $N(M) = 1/T(M)$  — ожидаемая частота, а  $T(M)$  — рекуррентный интервал землетрясения с магнитудой  $M$ . Подставляя (3) в (4), получаем вероятность исполнения за время  $t$  одного или больше толчков с магнитудой, равной или большей  $M$

$$P = 1 - \exp\{-t \times N(M_{\min}) \times [\exp(-\lambda M) - \exp(-\lambda M_{\max})] / [\exp(-\lambda M_{\min}) - \exp(-\lambda M_{\max})]\}. \quad (5)$$

Переписав с логарифмированием формулу (5) в виде

$$M = -1/\lambda \ln\{\exp(-\lambda M_{\max}) - [\exp(-\lambda M_{\min}) - \exp(-\lambda M_{\max})] \times \ln(1 - P) / [t \times N(M_{\min})]\}, \quad (6)$$

можно оценить магнитуду землетрясения, которое произойдет с заданной вероятностью в пределах некоторого временного интервала  $t$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чтобы рассчитать параметр  $\lambda$  по формуле (2), необходимо иметь значение  $M_{\min}$ , определяющее величину  $N(M_{\min})$ . Поскольку дискретизация землетрясений выполнена в пределах 0,5 единицы магнитуды, минимальное значение магнитуды в нашем случае не может точно соответствовать истинному числу толчков с  $M_{\min}$ . В связи с этим параметр  $\lambda$  был вычислен по формуле

$$\lambda = b \ln 10, \quad (7)$$

полученной в [35] при условии  $M_{\max} \rightarrow \infty$ , где  $b$  — наклон графика Гутенберга—Рихтера. Оценка влияния этого условия на рекуррентный интервал времени сильных землетрясений выполнена посредством сопоставления рекуррентных интервалов при значениях  $\lambda$ , определенных по (2) для величин  $M_{\max} = 8,0; 8,5; 9,0$  и  $M_{\max} \rightarrow \infty$ , по данным работы [35]. Получено, что значения параметра  $\lambda$ , вычисленные при этих  $M_{\max}$ , имеют отличие в пределах сотых долей. Подстановка  $\lambda$  в формулу (3) с дальнейшим пересчетом ожидаемой частоты события в рекуррентный интервал показала, что максимальные различия в рекуррентных интервалах землетрясений магнитуды  $M$  не превышают 8%. Таким образом, замена  $M_{\max} \rightarrow \infty$  на  $M_{\max} = 8,0; 8,5; 9,0$  при расчетах  $\lambda$  может обусловить незначительные изменения этого параметра, что дает возможность применения формулы (7).

При вычислении параметра  $\lambda$  для энергетических классов  $K_p$  использовалась формула, аналогичная (7), с заменой коэффициента  $b$  на наклон графика повторяемости  $\lambda$ . Графики повторяемости землетрясений Байкальского региона, трех районов и Монголии (рис. 5, а), полученные при использовании шкалы энергетических классов, показывают, что соотношение между числом и энергетическим классом земле-

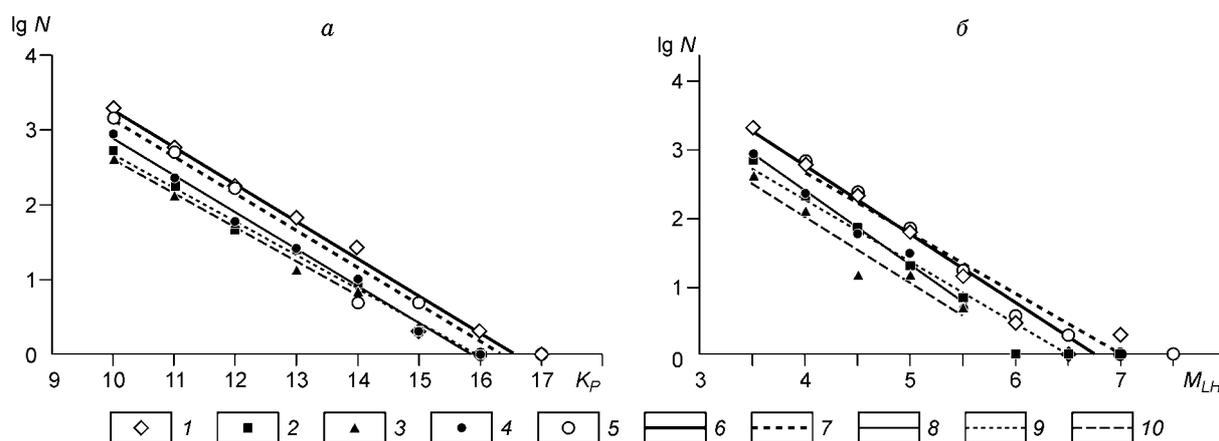


Рис. 5. Графики повторяемости землетрясений.

а — для шкалы энергетических классов  $K_p$ , б — для шкалы магнитуд  $M_{LH}$  1, 6 — Байкальский регион; 2, 9 — юго-западный район; 3, 10 — центральный район; 4, 8 — северо-восточный район; 5, 7 — Монголия.

Таблица 1. Ожидаемые частоты  $N$  (за год) и рекуррентные пикетвалы  $T$  землетрясений Байкальского региона, трех районов и Монголии

№ п/п	Энергетический класс за 1960—1991 гг.					Энергетический класс за 1960—1998 гг.					Магнитуда за 1960—1991 гг.							
	$N$ ( $K_{мин}$ )	$K_P$	$K_{max}$	$\lambda$	$N$	$T$ , лет	$N$ ( $K_{мин}$ )	$K_P$	$K_{max}$	$\lambda$	$N$	$T$ , лет	$N$ ( $M_{мин}$ )	$M_{DN}$	$M_{max}$	$\lambda$	$N$	$T$ , лет
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<i>Байкальский регион</i>																		
1	62	16	18	1,144	0,0582	18	66	16	18	1,143	0,0623	16	68	6,55	7,61	2,275	0,0601	17
2	62	17	18	1,144	0,0141	71	66	17	18	1,143	0,0151	66	68	7,08	7,61	2,275	0,0139	72
3	62	16	19	1,144	0,0627	16	66	16	19	1,143	0,0671	15	68	6,55	8,14	2,275	0,0642	16
4	62	17	19	1,144	0,0185	54	66	17	19	1,143	0,0199	50	68	7,08	8,14	2,275	0,0180	56
5	62	18	19	1,144	0,00448	223	66	18	19	1,143	0,00480	208	68	7,61	8,14	2,275	0,0041	241
6	62	16	20	1,144	0,0641	15	66	16	20	1,143	0,0687	15	68	6,55	8,67	2,275	0,0655	15
7	62	17	20	1,144	0,0200	50	66	17	20	1,143	0,0214	48	68	7,08	8,67	2,275	0,0192	52
8	62	18	20	1,144	0,00591	169	66	18	20	1,143	0,00634	159	68	7,61	8,67	2,275	0,0053	186
9	62	19	20	1,144	0,00143	700	66	19	20	1,143	0,00153	653	68	8,14	8,67	2,275	0,0012	805
<i>Юго-западный район</i>																		
1	17	16	18	1,038	0,0293	34	19,6	16	18	1,052	0,0313	32	23	6,55	7,61	2,070	0,0370	27
2	17	17	18	1,038	0,0076	130	19,6	17	18	1,052	0,00808	124	23	7,08	7,61	2,070	0,009	108
3	17	16	19	1,038	0,0321	31	19,6	16	19	1,052	0,0341	29	23	6,55	8,14	2,070	0,040	25
4	17	17	19	1,038	0,0104	96	19,6	17	19	1,052	0,0109	92	23	7,08	8,14	2,070	0,012	81
5	17	18	19	1,038	0,00272	368	19,6	18	19	1,052	0,00278	354	23	7,61	8,14	2,070	0,0030	323
<i>Центральный район</i>																		
1	14	16	18	1,045	0,0232	43	13	16	18	1,054	0,0205	49	13	6,55	7,61	2,189	0,0148	68
2	14	17	18	1,045	0,00604	166	13	17	18	1,054	0,00530	189	13	7,08	7,61	2,189	0,0035	284
3	14	16	19	1,045	0,0253	39	13	16	19	1,054	0,0223	45	13	6,55	8,14	2,189	0,0159	63
4	14	17	19	1,045	0,00817	122	13	17	19	1,054	0,00714	140	13	7,08	8,14	2,189	0,0046	216
5	14	18	19	1,045	0,00212	471	13	18	19	1,054	0,00185	542	13	7,61	8,14	2,189	0,0011	905
<i>Северо-восточный район</i>																		
1	29	16	18	1,130	0,0295	34	29	16	18	1,080	0,0395	25	28	6,55	7,61	2,477	0,0136	74
2	29	17	18	1,130	0,00721	139	29	17	18	1,080	0,0100	100	28	7,08	7,61	2,477	0,0028	347
3	29	16	19	1,130	0,0318	31	29	16	19	1,080	0,0429	23	28	6,55	8,14	2,477	0,0144	70
4	29	17	19	1,130	0,00953	105	29	17	19	1,080	0,0134	75	28	7,08	8,14	2,477	0,0036	273
5	29	18	19	1,130	0,00233	430	29	18	19	1,080	0,00340	294	28	7,61	8,14	2,477	0,0007	1290



Таблица 2. Возможные энергетический класс  $K_p$  и магнитуа  $M_{LH}$  землетрясений Байкальского региона, трех районов и Монголии за 50 лет при уровне вероятности  $P$

№ п/п	Энергетический класс за 1960—1991 гг.				Энергетический класс за 1960—1998 гг.				Магнитуа за 1960—1991 гг.			
	$P$	$K_{max}$	$t$ , лет	$K_p$	$P$	$K_{max}$	$t$ , лет	$K_p$	$P$	$M_{max}$	$t$ , год	$M_{LH}$
<i>Байкальский регион</i>												
1	0,05	18	50	17,87	0,05	18	50	17,88	0,05	8	50	7,85
2	0,1	18	50	17,76	0,1	18	50	17,77	0,1	8	50	7,73
3	0,2	18	50	17,55	0,2	18	50	17,57	0,2	8	50	7,54
4	0,05	19	50	18,65	0,05	19	50	18,67	0,05	8,5	50	8,13
5	0,1	19	50	18,39	0,1	19	50	18,42	0,1	8,5	50	7,93
6	0,2	19	50	18,00	0,2	19	50	18,04	0,2	8,5	50	7,66
<i>Юго-западный район</i>												
1	0,05	18	50	17,79	0,05	18	50	17,80	0,05	8	50	7,80
2	0,1	18	50	17,61	0,1	18	50	17,62	0,1	8	50	7,66
3	0,2	18	50	17,30	0,2	18	50	17,33	0,2	8	50	7,45
4	0,05	19	50	18,50	0,05	19	50	18,51	0,05	8,5	50	8,08
5	0,1	19	50	18,15	0,1	19	50	18,17	0,1	8,5	50	7,85
6	0,2	19	50	17,67	0,2	19	50	17,70	0,2	8,5	50	7,56
<i>Центральный район</i>												
1	0,05	18	50	17,74	0,05	18	50	17,71	0,05	8	50	7,58
2	0,1	18	50	17,52	0,1	18	50	17,47	0,1	8	50	7,36
3	0,2	18	50	17,18	0,2	18	50	17,10	0,2	8	50	7,08
4	0,05	19	50	18,39	0,05	19	50	18,32	0,05	8,5	50	7,72
5	0,1	19	50	18,00	0,1	19	50	17,92	0,1	8,5	50	7,44
6	0,2	19	50	17,48	0,2	19	50	17,38	0,2	8,5	50	7,12
<i>Северо-восточный район</i>												
1	0,05	18	50	17,77	0,05	18	50	17,83	0,05	8	50	7,49
2	0,1	18	50	17,58	0,1	18	50	17,68	0,1	8	50	7,26
3	0,2	18	50	17,26	0,2	18	50	17,42	0,2	8	50	7,00
4	0,05	19	50	18,42	0,05	19	50	18,57	0,05	8,5	50	7,58
5	0,1	19	50	18,06	0,1	19	50	18,27	0,1	8,5	50	7,31
6	0,2	19	50	17,57	0,2	19	50	17,82	0,2	8,5	50	7,02
<i>Монголия</i>												
Энергетический класс за 1964—1997 гг.					—	—	—	—	Магнитуа за 1960—1991 гг.			
1	0,05	18	50	17,88	—	—	—	—	0,05	8	50	7,94
2	0,1	18	50	17,76	—	—	—	—	0,1	8	50	7,88
3	0,2	18	50	17,55	—	—	—	—	0,2	8	50	7,77
4	0,05	19	50	18,67	—	—	—	—	0,05	8,5	50	8,34
5	0,1	19	50	18,42	—	—	—	—	0,1	8,5	50	8,22
6	0,2	19	50	18,03	—	—	—	—	0,2	8,5	50	8,02

Из табл. 1 следует, что рекуррентные интервалы сильных землетрясений Байкальского региона, определенные по шкале классов  $K_p$  и шкале магнитуд  $M_{LH}$ , практически совпадают. Аналогичные результаты получены при вычислении рекуррентных интервалов сильных землетрясений Монголии. Имеется небольшое различие в рекуррентных интервалах землетрясений юго-западного района. Существенные отличия рекуррентных интервалов, рассчитанных по шкале  $K_p$  и шкале  $M_{LH}$ , получены для землетрясений центрального и северо-восточного районов. В табл. 2 представлены результаты вычислений возможного энергетического класса  $K_p$  и магнитуды  $M_{LH}$  сильных землетрясений Байкальского региона, трех районов

Таблица 3. Вероятность  $P$  реализации сильных землетрясений Байкальского региона, трех районов и Монголии за 50 лет

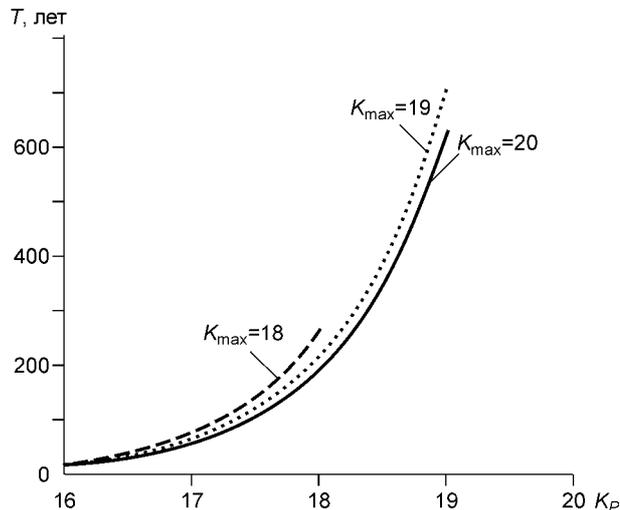
№ п/п	Энергетический класс за 1960—1991 гг.				Энергетический класс за 1960—1998 гг.				Магнитуда за 1960—1991 гг.			
	$K_p$	$K_{max}$	$t$ , лет	$P$	$K_p$	$K_{max}$	$t$ , лет	$P$	$M_{LH}$	$M_{max}$	$t$ , лет	$P$
<i>Байкальский регион</i>												
1	16	18	50	0,946	16	18	50	0,956	7	8	50	0,655
2	17	18	50	0,506	17	18	50	0,529	7,5	8	50	0,228
3	16	19	50	0,957	16	19	50	0,965	7	8,5	50	0,682
4	17	19	50	0,606	17	19	50	0,630	7,5	8,5	50	0,289
5	18	19	50	0,201	18	19	50	0,214	8	8,5	50	0,079
<i>Юго-западный район</i>												
1	16	18	50	0,769	16	18	50	0,790	7	8	50	0,512
2	17	18	50	0,319	17	18	50	0,332	7,5	8	50	0,171
3	16	19	50	0,799	16	19	50	0,818	7	8,5	50	0,543
4	17	19	50	0,405	17	19	50	0,420	7,5	8,5	50	0,225
5	18	19	50	0,127	18	19	50	0,132	8	8,5	50	0,065
<i>Центральный район</i>												
1	16	18	50	0,687	16	18	50	0,640	7	8	50	0,238
2	17	18	50	0,261	17	18	50	0,233	7,5	8	50	0,066
3	16	19	50	0,718	16	19	50	0,672	7	8,5	50	0,255
4	17	19	50	0,335	17	19	50	0,300	7,5	8,5	50	0,087
5	18	19	50	0,101	18	19	50	0,088	8	8,5	50	0,023
<i>Северо-восточный район</i>												
1	16	18	50	0,771	16	18	50	0,860	7	8	50	0,198
2	17	18	50	0,303	17	18	50	0,393	7,5	8	50	0,048
3	16	19	50	0,797	16	19	50	0,882	7	8,5	50	0,209
4	17	19	50	0,379	17	19	50	0,487	7,5	8,5	50	0,062
5	18	19	50	0,110	18	19	50	0,156	8	8,5	50	0,014
<i>Монголия</i>												
Энергетический класс за 1964—1997 гг.					—				Магнитуда за 1960—1991 гг.			
1	16	18	50	0,939	—	—	—	—	7	8	50	0,917
2	17	18	50	0,506	—	—	—	—	7,5	8	50	0,483
3	16	19	50	0,952	—	—	—	—	7	8,5	50	0,934
4	17	19	50	0,610	—	—	—	—	7,5	8,5	50	0,592
5	18	19	50	0,211	—	—	—	—	8	8,5	50	0,211

и Монголии за 50 лет при уровне вероятности  $P$ . Оценки вероятности  $P$  реализации сильных землетрясений Байкальского региона, трех районов и Монголии с энергетическим классом  $K_p$  и магнитудой  $M_{LH}$  за этот же интервал времени приведены в табл. 3. Параметры  $\lambda$ ,  $N(K_{min})$ ,  $N(M_{min})$ ,  $K_{min}$  и  $M_{min}$  такие же, как и в табл. 1.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Стабильность и достоверность оценок рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений зависят, очевидно, от количества и качества используемых фактических данных, надежности применяемых методов и адекватности задания максимальной магнитуды  $M_{max}$ . Материалы каталога землетрясений Прибайкалья и каталога землетрясений Монголии не проверены на однородность. Как известно [39], основными причинами, при которых могут произойти изменения в магнитудной оценке каталогов, являются: а) введение новых систем регистрации и обработки сейсмической информации; б) удаление или введение новых сейсмических станций; в) изменения в процедуре определения магнитуд. Очевидно, что при выполнении любого из этих условий могут произойти изменения и в энергетической оценке землетрясений в региональных каталогах. К сожалению, оценка степени изменения энергетиче-

**Рис. 6. Зависимость рекуррентных интервалов сильных землетрясений Байкальского региона от величины максимально возможного энергетического класса  $K_{p_{max}}$ .**



ского класса и магнитуды землетрясений под влиянием аппаратурных и структурных преобразований региональных сетей сейсмических станций Прибайкалья и Монголии не проведена и анализ каталога землетрясений и сейсмического режима этих регионов выполняется при использовании, возможно, неоднородных материалов.

Чтобы оценить степень влияния фактического материала на полученные значения рекуррентных интервалов и вероятности сильных сейсмических событий, массивы используемых данных по землетрясениям Байкальского региона и трех районов были увеличены до 1998 г. Результаты вычислений для расширенных массивов данных приведены в табл. 1—3. Из них следует (см. табл. 1, 3), что при увеличении объема исходных материалов оценки рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений, полученные для Байкальского региона и юго-западного района, практически не изменились. Более заметные изменения произошли в оценках рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений северо-восточного и центрального районов, причем наблюдаемые отклонения в оценках рекуррентных интервалов этих регионов имеют противоположные тенденции. Возможно, это указывает на то, что оценки рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений зависят не только от количества и качества фактического материала, но и от устойчивости законов распределения сильных и слабых сейсмических событий и совпадения теоретического и реального законов распределения землетрясений исследуемого региона.

Чтобы показать влияние заданного максимального энергетического класса на оценки рекуррентных интервалов сильных землетрясений, представлены результаты расчетов рекуррентных интервалов сильных землетрясений Байкальского региона, аппроксимированные до  $K_{p_{max}}$  (рис. 6). На нем наблюдается расхождение графиков, достигающее десятков процентов с повышением  $K_{p_{max}}$ . Рекуррентные соотношения получены нами при использовании энергетических классов в пределах от  $K_p = 10$  до  $K_p = 16$ . Аппроксимация этих соотношений на более сильные землетрясения выполнена при условии, что распределение толчков различных классов подчиняется экспоненциальному закону [9]. Это условное приближение, поскольку наблюдаются и другие распределения [40]. Предположение распределения Пуассона для последовательностей землетрясений менее надежно для сильных толчков, которые лучше следуют закону Пойя [41]. Процесс Пуассона обеспечивает асимптотическое приближение к распределению сильных землетрясений во времени [11]. Тем не менее подобное распределение землетрясений было использовано при расчете вероятности характеристических землетрясений Южной Калифорнии [5] и при построении трех вероятностных карт ОСР-97 [42]. В данной работе использованы целочисленные значения максимального энергетического класса характеристических землетрясений. Можно полагать, что уточнение этого параметра до десятых долей обеспечит более точный прогноз рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений.

Совпадение рекуррентных интервалов землетрясений Байкальского региона, определенных по шкале классов и шкале магнитуд, указывает на возможность применения шкалы энергетических классов при расчетах вероятности сильнейших землетрясений. Наблюдаемые отличия в рекуррентных интервалах, определенных по шкале классов  $K_p$  и шкале магнитуд  $M_{LH}$  для землетрясений центрального и северо-западного районов, обусловлены, скорее всего, двумя причинами. Первая заключается в недостаточно точном определении наклонов  $b$  графиков повторяемости из-за небольшого диапазона магнитуд, т. е. в погрешностях определения параметра  $\lambda$ . Кроме того, формула (8), полученная по данным всего Байкальского региона, может менее надежно характеризовать корреляцию магнитуды и класса землетрясений районов. Поэтому значения  $M$  и  $M_{max}$  этих регионов, представленные в табл. 1, не будут точно соответствовать величинам сопоставляемых  $K$  и  $K_{max}$ , что и является второй возможной причиной отличия рекуррентных интервалов, определенных по шкале классов и шкале магнитуд для землетрясений центрального и северо-западного регионов. К сожалению, для надежного определения параметра  $b$  и уравнений кор-

реляции магнитуды и энергетического класса землетрясений отдельных районов пока не хватает фактического материала.

Анализ результатов указывает, что при  $K_p = 19$  за 470 лет в трех районах Байкальского региона теоретически могут произойти не менее трех землетрясений с  $K_p = 18$  (см. табл. 1). В пересчете на Байкальский регион средний рекуррентный интервал землетрясений такого класса составляет около 160 лет, т. е. почти на 60 лет отличается от рекуррентного интервала ( $\approx 220$  лет), вычисленного отдельно для Байкальского региона (см. табл. 1, строка № 5). Известно, что комплект из трех вероятностных карт ОСР-97, полученный при исследовании по общему сейсмическому районированию в рамках проблемы „Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии“, позволяет оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных сроков службы и категорий ответственности на трех уровнях, отражающих расчетную интенсивность  $I$  сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64, ожидаемых на данной площади с заданной вероятностью  $P$  в течение интервала времени  $t = 50$  лет [42]. На этих картах интенсивность сотрясений грунтов в пределах Байкальского региона и Алтае-Саянской области рассчитана с учетом сейсмического потенциала объединенного Алтае-Саяно-Байкальского региона. Результаты, полученные выше для Байкальского региона и трех входящих в его состав районов, дают возможность предположения о том, что периоды повторяемости и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона и Алтае-Саянской области изменятся, если рассматривать их в качестве самостоятельных сейсмоактивных регионов.

Чтобы оценить полученные теоретические результаты, по данным „Каталога землетрясений Прибайкалья“ были вычислены средние рекуррентные интервалы  $T$  сейсмических событий Байкальского региона с  $K_p = 16$  и 17 за 260 лет. Если сильное землетрясение сопровождалось афтершоками с  $K_p = 16$ , то из группы афтершоков такого класса выбирался один толчок. Для всего региона  $T_{16} = 13 \pm 11$  лет при  $K_p = 16$  и  $T_{17} = 45 \pm 25$  лет при  $K_p = 17$ . Для землетрясений юго-западного района  $T_{16} = 30 \pm 15$ , центрального —  $T_{16} = 30 \pm 17$  и северо-восточного —  $T_{16} = 25 \pm 14$  лет. Если сопоставить эти цифры с данными табл. 1, то можно заметить, что в пределах погрешностей они соответствуют рекуррентным интервалам сильнейших землетрясений Байкальского региона и трех районов. Средние рекуррентные интервалы  $T$  сейсмических событий Монголии с  $K_p = 16$  и 17 были вычислены за 240 лет по данным из работы [26]. Средние рекуррентные интервалы землетрясений Монголии равны  $T_{16} = 14 \pm 13$  лет и  $T_{17} = 52 \pm 48$  лет. Если сопоставить эти цифры с данными табл. 1, то можно заметить, что они достаточно близко соответствуют рекуррентным интервалам сильнейших землетрясений Монголии, полученным для шкалы энергетических классов. Менее надежно согласуются результаты для шкалы магнитуд  $M_{LH}$  в центральном и северо-восточном районах, и поэтому мы отдаем предпочтение оценкам, полученным при использовании шкалы энергетических классов.

## ВЫВОДЫ

В работе представлены оценки рекуррентных интервалов и вероятности сильных землетрясений Байкальского региона, трех входящих в него районов и Монголии, полученные в рамках гипотезы характеристических землетрясений при использовании принципа максимума энтропии и распределения Пуассона. Расчеты выполнены для набора характеристических магнитуд и энергетических классов землетрясений. Если величину максимально возможного энергетического класса землетрясений принять равной  $K_p = 19$ , то рекуррентные интервалы характеристических толчков с  $K_p = 18$  составят 220 лет для Байкальского региона, 370, 470 и 430 лет для юго-западного, центрального и северо-восточного районов и 210 лет для Монголии. При  $K_p = 19$  в пределах этих территорий величины энергетического класса землетрясений с 10 %-й вероятностью реализации в течение 50 лет равны ( $K_p$ ): 18,39; 18,15; 18,00; 18,06 и 18,42; вероятности землетрясений с  $K_p = 18,0$  в течение 50 лет составляют ( $P$ ): 0,20; 0,13; 0,10; 0,11 и 0,21 соответственно.

Авторы благодарят А.Д. Завьялова и анонимного рецензента за конструктивные замечания, учет которых позволил улучшить содержание статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология, 1999, № 4—5, с. 6—22.
2. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003, т. 44, № 5, с. 391—406.

3. **Соболев Г.А.** Перспективы прогноза землетрясений // Проблемы геофизики XXI века, Кн. 2. М., Наука, 2003, с. 158—179.
4. **Современная динамика** литосферы континентов / Ред. Н.А. Логачев. М., Недра, 1989, 278 с.
5. **Jackson D.D., Aki K., Cornell C.A. et al.** Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024 // Bull. Seism. Soc. Amer., 1995, v. 85, № 2, p. 379—439.
6. **McGarr A.** Upper bounds on near-source peak ground motions based on a model of inhomogeneous faulting // Bull. Seism. Soc. Amer., 1982, v. 72, p. 1825—1841.
7. **Ключевский А.В., Демьянович В.М.** Оценка колебаний скального грунта с учетом динамических параметров очагов землетрясений Южного Прибайкалья (на примере городов юга Восточной Сибири) // Физика Земли, 2002, № 9, с. 68—80.
8. **Kagan Y.Y.** Statistics of characteristic earthquakes // Bull. Seism. Soc. Amer., 1993, v. 83, p. 7—24.
9. **Dong W.M., Bao A.B., Shan H.C.** Use of maximum entropy principle in earthquake recurrence relationships // Bull. Seism. Soc. Amer., 1984, v. 74, № 2, p. 725—737.
10. **Cornell C.** Engineering seismic risk analysis // Bull. Seism. Soc. Amer., 1968, v. 58, № 5, p. 1583—1606.
11. **Lomnitz C.** Poisson processes in earthquake studies // Bull. Seism. Soc. Amer., 1973, v. 63, № 2, p. 735.
12. **Мишарина Л.А.** Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны // Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М., Наука, 1972, с. 161—171.
13. **Doser D.I.** Faulting within the western Baikal rift as characterized by earthquake studies // Tectonophysics, 1991, v. 196, № 1, 2, p. 87—107.
14. **Doser D.I.** Faulting within the eastern Baikal rift as characterized by earthquake studies // Ibid, p. 109—139.
15. **Ключевский А.В.** Современная динамика Байкальского рифта и особенности пространственно-временного распределения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология, 2003, № 5, с. 65—78.
16. **Molnar P., Tapponnier P.** Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // Science, 1975, v. 189, p. 419—425.
17. **Zonenshain L.P., Savostin L.A.** Geodynamics of the Baikal Rift Zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics, 1981, v. 76, p. 1—45.
18. **Gao S., Davis P.M., Liu H. et al.** Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone // Nature, 1994, v. 371, p. 149—151.
19. **Logatchev N.A.** History and geodynamics of the lake Baikal rift in context of the Eastern Siberia rift system: a review // Bull. Centres Rech. Elf Explor. Prod., 1993, v. 17, № 2, p. 353—370.
20. **Молнар П., Курушин Р.А., Кочетков В.М. и др.** Деформации и разрывообразование при сильных землетрясениях в Монголо-Сибирском регионе // Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск, Наука, 1995, с. 5—55.
21. **Tapponnier P., Molnar P.** Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien-Shan, Mongolia and Baykal regions // J. Geophys. Res., 1979, v. 84, p. 3425—3459.
22. **Новый каталог** сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М., Наука, 1977, 535 с.
23. **Голенецкий С.И., Пензина Т.Г.** Форшоки и афтершоки катастрофического Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2—3. М., ОИФЗ РАН, 1995, с. 308—314.
24. **Голенецкий С.И.** Землетрясения в Иркутске. Иркутск, ИМЯ, 1997, 92 с.
25. **Современная динамика** литосферы континентов / Ред. Н.А. Логачев. М., Недра, 1995, 560 с.
26. **Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М. и др.** Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М., Наука, 1985, 222 с.
27. **Baljinnyam I., Bayasgalan A., Borisov B.A. et al.** Ruptures of major earthquakes and active deformation in Mongolia and its surroundings // Geol. Soc. Amer., 1993, Memoir 181, 59 p.
28. **Раутиан Т.Г.** Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. М., 1964, с. 88—93. (Тр. ИФЗ АН СССР; № 32).
29. **Golenetsky S.I.** Problems of seismicity of the Baikal rift zone // J. Geodyn., 1990, v. 11, p. 293—307.
30. **Klyuchevskii A.V., Bayar G., Demyanovich V.M. et al.** Seismicity and seismic zoning // Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia. Ulaanbaatar—Irkutsk, 2004, p. 113—203.
31. **Солоненко Н.В., Солоненко А.В.** Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск, Наука, 1987, 95 с.
32. **Ключевский А.В.** Группы землетрясений как индикаторы напряженно-деформированного состояния литосферы в Байкальском регионе // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, с. 332—335.

33. **Голенецкий С.И., Демьянович В.М., Филина А.Г.** Представительность землетрясений Южной Сибири и Монголии в 1960—1990 гг. // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, Вып. 1. М., ОИФЗ РАН, 1993, с. 83—85.
34. **Голенецкий С.И., Демьянович В.М., Дреннова Г.Ф. и др.** Каталог землетрясений Южной Сибири и Монголии // Там же, с. 80—82.
35. **Sun J., Pan T.-Ch.** The probability of very large earthquakes in Sumatra // Bull. Seism. Soc. Amer., 1995, v. 85, № 4, p. 1226—1231.
36. **Der Kiureghian A., Ang A.H.-S.** A fault-rupture model for seismic risk analysis // Bull. Seism. Soc. Amer., 1977, v. 67, № 3, p. 1173—1194.
37. **Gardner J.K., Knopoff L.** Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bull. Seism. Soc. Amer., 1974, v. 64, № 5, p. 1363—1367.
38. **Ключевский А.В., Демьянович В.М.** Некоторые результаты сопоставления магнитудных шкал землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Сейсмический мониторинг в Сибири и на Дальнем Востоке. Иркутск, Арт-пресс, 2002, с. 110—128.
39. **Zuniga F.R., Wyss M.** Inadvertent changes in magnitude reported in earthquake catalogs: their elevation through *b*-value estimates // Bull. Seism. Soc. Amer., 1995, v. 85, № 6, p. 1858—1866.
40. **Speidel D.H., Mattson P.H.** The polymodal frequency-magnitude relationship of earthquakes // Bull. Seism. Soc. Amer., 1993, v. 83, № 6, p. 1893—1901.
41. **Гайский В.Н.** Статистические исследования сейсмического режима. М., Наука, 1970, 122 с.
42. **Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации.** М., ОИФЗ РАН, 1999, 57 с.

*Рекомендована к печати 29 ноября 2004 г.  
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию  
30 апреля 2004 г.*