

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-3-12>
УДК 550.34

ТЕСТИРОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЗОН ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

А.Б. Садыкова, Г.Я. Хачикян

Институт сейсмологии, Алматы, Казахстан

E-mail для контактов: galina.khachikyan@gmail.com

На нескольких территориях Восточно-Казахстанской области (Усть-Каменогорск, Семипалатинск, объект «Ульба», Зайсан) протестирован метод расчета сейсмического потенциала (максимально возможной магнитуды землетрясения) по геомагнитным данным: значениям геомагнитной Z-компоненты, рассчитанной в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат (GSM). Оценки сейсмopotенциала по геомагнитным данным сравнивались с данными о потенциале сейсмогенерирующих зон на территории Восточно-Казахстанской области, полученным по сейсмологическим, геолого-геофизическим данным и результатам дешифрирования космоснимков. Получено удовлетворительное согласие между оценками двумя разными способами, что подтверждает возможность применения альтернативного метода оценки сейсмopotенциала в регионах с дефицитом информации о режиме сейсмичности (возможно, находящихся в режиме временного сейсмического затихания).

Ключевые слова: *максимально возможная магнитуда землетрясений, геомагнитное поле, землетрясения, сейсмический потенциал, Восточный Казахстан.*

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие 20 века в солнечной-земной физике появился новый для того времени термин «космическая погода», характеризующий изменения на Солнце, в межпланетном магнитном поле, магнитосфере, ионосфере, геомагнитном поле, которые могут оказывать влияние на работу бортовых и наземных технологических систем, на состояние различных геосфер, а также угрожать здоровью обитателей планеты [1]. Одновременно, исследование верхних геосфер показало, что их состояние зависит не только от процессов на Солнце и в межпланетной среде, но и от естественных и техногенных процессов в литосфере, например [2, 3]. Научные результаты, полученные в этих направлениях, создали основу для введения в солнечно-земную физику еще одного нового термина – «лито-космическая погода» по инициативе профессора К. Yumoto (Япония), и в 2011 г. в Африке была проведена первая международная школа по вопросам лито-космической погоды с выпуском сборника избранных статей [4].

Одним из главных вопросов лито-космической погоды является вопрос о связи между вариациями солнечной и сейсмической активности, который пока является дискуссионным [5]. Физический механизм воздействия довольно слабых полей космического происхождения на мощные тектонические процессы пока не понятен; трудности решения этого вопроса обсуждались в недавней работе [6]. Не решена еще до конца и проблема взаимодействия различных геосфер и геофизических полей, хотя, как отмечено в [7]: «В целом, Земля со всеми геосферами и геофизическими полями представляет собой единую динамическую систему, элементы которой не могут существовать независимо и вынуждены взаимодействовать между собой, обмениваясь массой и энергией». Полученные к настоящему времени результаты стати-

стических исследований демонстрируют соответствие между вариациями характеристик различных геосфер, в том числе, в связи с вариациями солнечной активности [6–18 и ссылки внутри].

Наиболее ярким проявлением воздействия солнечной активности на Землю являются геомагнитные бури – возмущения геомагнитного поля длительностью от нескольких часов до нескольких суток. Согласно современным взглядам, непосредственной причиной геомагнитных бурь являются возмущенные потоки солнечного ветра на орбите Земли, источниками которых, в свою очередь, являются выбросы солнечной корональной массы и корональные дыры [19]. На вопрос о возможном влиянии геомагнитных бурь на сейсмическую активность пока не получено однозначного ответа, хотя он тоже изучается не одно десятилетие. Основное количество геомагнитных бурь (особенно сильных) начинается с внезапного начала – SSC (Storm Sudden Commencement), связанного с поджатием дневной магнитосферы магнитогидродинамической ударной волной солнечного ветра, что приводит к резкому увеличению горизонтальной компоненты геомагнитного поля почти одновременно на всей Земле. Исследования [11–13] показали, что отклик сейсмической активности может запаздывать относительно SSC на несколько суток (от 2 до 7), а характер отклика может изменяться в зависимости от тектонического строения региона. На территориях, которые подстилаются породами с низкоомным электрическим сопротивлением, наблюдается повышение сейсмической активности через несколько суток после начала геомагнитной бури (положительный эффект), а на территориях, подстилаемых высокоомными породами – сейсмическая активность уменьшается (отрицательный эффект).

В то же время, в работе [20] исследовался отклик глобальной сейсмичности непосредственно на вне-

запное начало бури (в промежутке времени ± 60 минут относительно SSC). Показано, что до момента SSC количество землетрясений на планете было больше, чем после. Сделано предположение, что поджатие магнитосферы и усиление токов Чепмена-Ферраро на магнитопаузе, обусловленное приходом ударной волны солнечного ветра, порождающей SSC, подавляет глобальную сейсмичность, и что воздействие внешних факторов на сейсмический режим Земли может быть практически мгновенным, не зависящим от тектонических условий в разных сейсмоактивных регионах, поскольку результат получен по данным о глобальной сейсмической активности.

Отдельные геомагнитные бури могут вызвать драматические изменения в структуре радиационного пояса Земли [21], заключающиеся в том, что во время геомагнитной бури может опустошаться внешняя электронная часть радиационного пояса и формироваться новый (дополнительный) пояс высокоэнергичных электронов в нижней магнитосфере вокруг определенных геомагнитных силовых линий. В работе [18] показано, что спустя примерно 2 месяца после начала геомагнитной бури с сопутствующим формированием дополнительного долгоживущего пояса высокоэнергичных заряженных частиц вокруг определенных геомагнитных линий, сейсмическая активность повышается в регионах, пронизанных этими линиями. Такие длительные по времени запаздывания сейсмического отклика на геомагнитную бурю говорят в пользу того, что воздействие космической энергии на сейсмичность может быть не триггерным, как сейчас в основном предполагают, поэтому требуется более расширенный поиск свидетельств о соответствии в вариациях космических и сейсмических параметров, чтобы понять механизм солнечно-литосферных связей.

В настоящее время известно, что необходимым условием для генерации геомагнитной бури является противоположная ориентация силовых линий магнитного поля солнечного ветра (межпланетного магнитного поля) относительно силовых линий магнитного поля Земли, что приводит к пересоединению магнитных линий межпланетного и геомагнитного полей [22] и поступлению энергии солнечного ветра в околоземное пространство. Процесс проникновения энергии солнечного ветра в околоземное пространство наилучшим образом отображается геоцентрической солнечно магнитосферной системе координат GSM (Geocentric Solar Magnetosphere coordinate system) [23]. Учитывая этот факт, возникла идея [24] проанализировать пространственные вариации характеристик глобальной сейсмичности не в общепринятой (географической) системе координат, а в системе GSM, которую используют при изучении процесса проникновения энергии солнечного ветра в околоземное пространство. Было обнаружено, что сейсмический потенциал территории (максимально возможная здесь магнитуда землетрясения M_{max}) мо-

жет быть определен (в первом приближении) по максимально возможному на этой территории абсолютному значению геомагнитной Z-компоненты, рассчитанной в GSM системе координат. В данной статье мы приводим кратко алгоритм [24] для определения величины M_{max} по геомагнитным данным, и тестируем его работоспособность на территории Восточно-Казахстанской области.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ (В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ) СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

В геоцентрической солнечно магнитосферной системе координат GSM, ось X направлена от Земли к Солнцу, ось Z перпендикулярна оси X, но направлена так, что ось геомагнитного диполя постоянно находится в плоскости XOZ, а ось Y перпендикулярна оси геомагнитного диполя и дополняет систему до правой (рисунок 1).

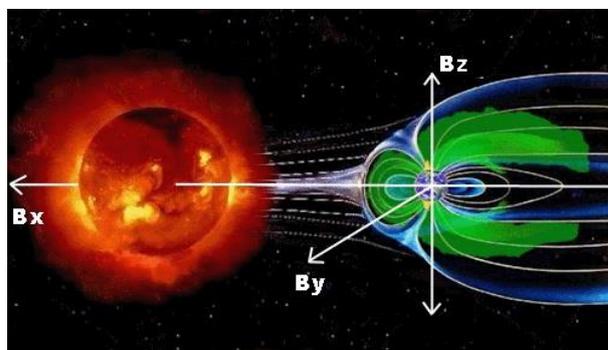


Рисунок 1. Схематический рисунок геоцентрической солнечно-магнитосферной системы координат (GSM)

Алгоритм преобразования географической системы координат в систему координат GSM приведен, например, в [25]. Из-за несовпадения оси геомагнитного диполя с осью вращения Земли, а также из-за суточного вращения Земли вокруг своей оси и сезонного движения по орбите вокруг Солнца, геомагнитные GSM компоненты (X_{GSM} , Y_{GSM} и Z_{GSM}) изменяются не только в пространстве, но и во времени, показывая ярко выраженные суточные и сезонные вариации, что, для примера, демонстрирует рисунок 2.

В [24] были определены значения геомагнитной Z_{GSM} -компоненты в эпицентрах всех землетрясений с $M \geq 4,5$, произошедших на планете в 1973–2010 гг. (173477 событий) и построены гистограммы распределения числа землетрясений и их магнитуд в зависимости от значений геомагнитных параметров в эпицентре в момент сейсмического события (рисунки 3, 4, соответственно). Для расчетов использовался глобальный сейсмологический каталог USGS [26], международная справочная модель главного геомагнитного поля IGRF [27] и технология расчета геомагнитных координат в GSM-системе координат в каждом эпицентре, разработанная в [28] на основе компьютерных кодов программы GEOPACK [29]. Рисунок 3 показывает, что на планете наибольшее коли-

**ТЕСТИРОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЗОН
ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

чество землетрясений с $M \geq 4,5$ происходит в регионах с большими положительными значениями геомагнитной Z_{GSM} -компоненты.

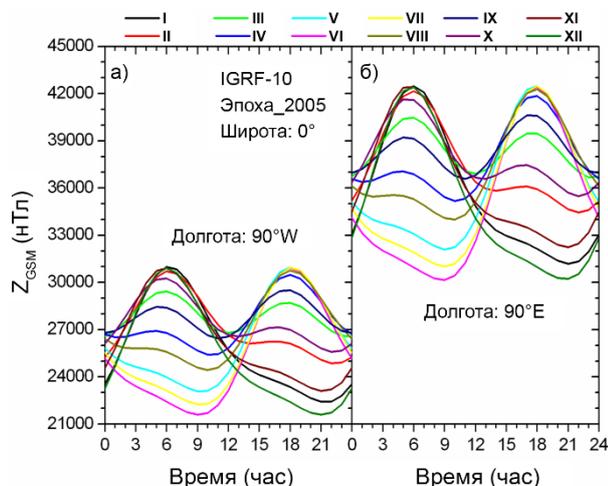


Рисунок 2. Сезонно-суточные вариации геомагнитной Z_{GSM} -компоненты на экваторе на долготах $90^\circ W$ и $90^\circ E$, где по горизонтальной оси указано время на Гринвичском меридиане, а на вертикальной – значения Z_{GSM} , как получено в работе [24]

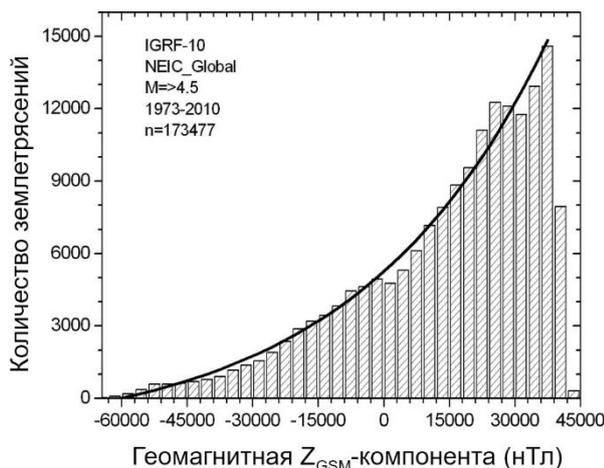


Рисунок 3. Гистограмма распределения числа землетрясений с $M \geq 4,5$, произошедших на планете в 1973–2010 гг., в зависимости от значения геомагнитной Z_{GSM} -компоненты в эпицентре во время сейсмического события, как получено в работе [24]

На рисунке 4 представлено распределение магнитуд землетрясений в зависимости от логарифма абсолютного значения геомагнитной Z_{GSM} -компоненты в эпицентре во время сейсмического события из работы [24]. На рисунке черная ломаная линия (огibaющая) соединяет максимальные значения магнитуд (M_{max}) в последовательных бинах ($\log[\text{abs}(Z_{GSM})]$) размером 0,15. Красная прямая есть линейная аппроксимация огibaющей в виде:

$$M_{max} = a + b \{ \text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})] \}, \quad (1)$$

где $a = 5,22 \pm 0,17$, $b = 0,78 \pm 0,06$, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,83$, и вероятностью 0,95%.

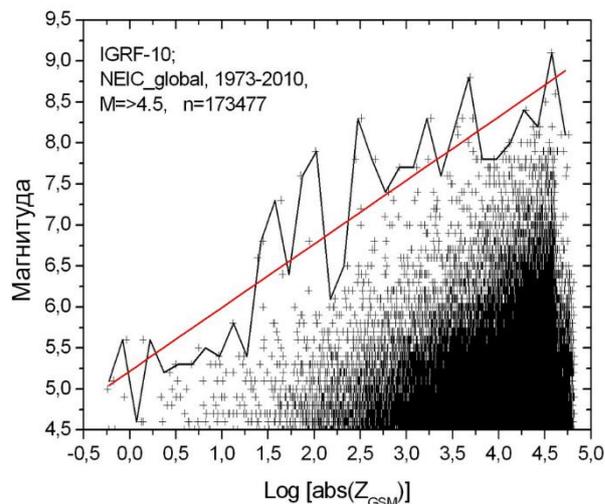


Рисунок 4. Распределение магнитуд землетрясений с $M \geq 4,5$, произошедших на планете в 1973–2010 гг., в зависимости от логарифма абсолютного значения геомагнитной Z_{GSM} -компоненты в эпицентре во время сейсмического события, как получено в работе [24]

В работе [30] были уточнены коэффициенты регрессионного уравнения (1) для локальной сейсмоактивной территории Северного Тянь-Шаня, ограниченной координатами $42,83^\circ N - 43,5^\circ N$, $76^\circ E - 78^\circ E$, где в недалеком прошлом произошли сильнейшие в регионе землетрясения: Верненское 1887 г. с $M = 7,3$ и Кеминское 1911 г. с $M = 8,2$. Использовался региональный каталог землетрясений с энергетическим классом $K \geq 7,0$ за 1970–2010 гг. (1061 событие). На рисунке 5 представлено распределение энергетического класса этих землетрясений в зависимости от параметра $\{ \text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})] \}$.

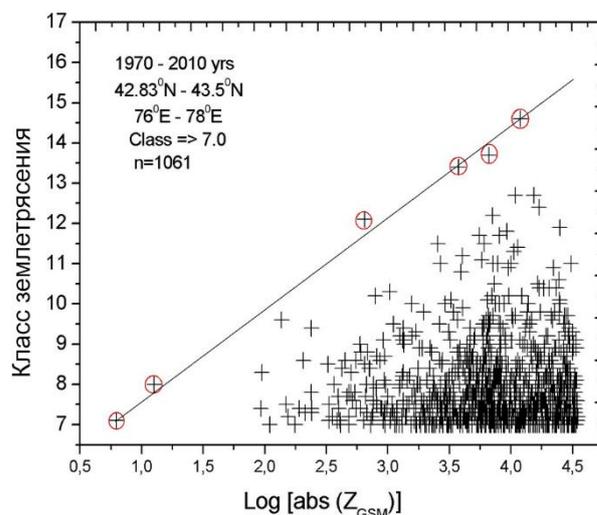


Рисунок 5. Распределение энергетического класса землетрясений с $K \geq 7,0$, произошедших в 1970–2010 гг. на территории Северного Тянь-Шаня, ограниченной координатами $42,83^\circ N - 43,5^\circ N$, $76^\circ E - 78^\circ E$ (1061 событие) в зависимости от значения параметра $\{ \text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})] \}$ в эпицентре во время землетрясения, как получено в работе [30]

Видна идентичность в характере распределения энергетических характеристик землетрясений в зависимости от параметра $\{\text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\}$, как для планеты в целом (рисунок 4), так и для локальной территории (рисунок 5). Конечно, при высоких значениях параметра $\{\text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\}$ могут возникать землетрясения разных классов, но максимально возможные энергетические классы (обведены красными кругами) показывают достаточно четкую линейную зависимость от величины этого параметра. Прямая линия на рисунке 5 есть линейная аппроксимация максимально возможных значений K , которая имеет вид:

$$K_{\text{max}} = (5,4 \pm 0,13) + (2,46 \pm 0,05) \{\text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\}, \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации $R^2=0,998$, среднеквадратическим отклонением $SD=0,01$, с вероятностью $P=0,95$.

В работе [31] получено соотношение между энергетическим классом землетрясения K и локальной магнитудой M_L в виде:

$$K = 1,8M_L + 4,0. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), можно получить соотношение для расчета максимально возможной локальной магнитуды землетрясения ($M_{L\text{max}}$) в зависимости от параметра $\{\text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\}$:

$$M_{L\text{max}} = \{1,4 + 2,46 \text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\} / 1,8. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

На рисунках 6, 7 приведены, соответственно, сезонно-суточные вариации геомагнитной Z_{GSM} -компоненты, и максимально возможных магнитуд землетрясений $M_{L\text{max}}$ на территории г. Усть-Каменогорск с координатами $49,57^\circ \text{ N}$, $82,73^\circ \text{ E}$. Из рисунка 6 следует, что значения Z_{GSM} на этой территории всегда отрицательные. Это позволяет заключить, в соответствии с гистограммой на рисунке 3, что вероятность возникновения здесь землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ во много раз меньше по сравнению с регионами, где Z_{GSM} достигает больших положительных значений. В соответствии с эмпирически полученным соотношением (4), максимально возможная магнитуда землетрясения $M_{L\text{max}}$ зависит от абсолютного значения Z_{GSM} , что приводит к двум вариантам расчета величины $M_{L\text{max}}$: для минимальных отрицательных значений Z_{GSM} , когда вероятность возникновения землетрясений еще достаточно высокая, и для максимальных отрицательных значений Z_{GSM} , когда вероятность возникновения землетрясений очень низкая, но их магнитуды могут быть высокими, как показывают наблюдаемые сейсмологические данные для всей планеты (рисунок 3). Приведенные на рисунке 6 данные говорят, что на территории г. Усть-Каменогорск минимальное отрицательное значение $Z_{\text{GSM}} = -4276$ нТл, а максимальное отрицательное зна-

чение $Z_{\text{GSM}} = -45825$ нТл. Тогда при расчете $M_{L\text{max}}$ для территории г. Усть-Каменогорск получим:

$$\text{вариант 1: } M_{L\text{max}} = \{1,4 + 2,46 \text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\} / 1,8 = \\ = (1,4 + 2,46 \text{Log } 4276) / 1,8 = 5,74,$$

$$\text{вариант 2: } M_{L\text{max}} = \{1,4 + 2,46 \text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\} / 1,8 = \\ = (1,4 + 2,46 \text{Log } 45825) / 1,8 = 7,15. \quad (5)$$

Оценки сейсмopotенциала по геомагнитным данным (5) сравнивались с оценкой Институтом сейсмологии потенциала сейсмогенерирующих зон на территории Восточно-Казахстанской области по сейсмологическим, геолого-геофизическим данным и результатам дешифрирования космоснимков (рисунок 8). Представленная на рисунке 8 карта показывает, что территория г. Усть-Каменогорск расположена на стыке сейсмогенерирующих зон № 1 и № 2, и максимально возможная здесь магнитуда землетрясения может быть $M \leq 6,0$, что хорошо поддерживает первый вариант расчетов (5), где получено $M_{L\text{max}} = 5,74$. То есть, при расчете сейсмopotенциала альтернативным методом на территории г. Усть-Каменогорск, реализуется вариант 1 из соотношений (5), при котором вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 4,5$ на этой территории наиболее высокая.

Ранее в [32] уже был апробирован альтернативный метод расчета сейсмического потенциала (по геомагнитным данным) на территории размещения Банка НОУ МАГАТЭ на объекте «Ульба» с координатами $50^\circ 15' \text{ N}$; $83^\circ 22' \text{ E}$. Анализ сезонно-суточных вариаций геомагнитной Z_{GSM} -компоненты показал, что на этой территории значения Z_{GSM} всегда отрицательные, то есть, вероятность возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ достаточно низкая, как демонстрирует рисунок 3. На территории объекта «Ульба» минимальное отрицательное значение $Z_{\text{GSM}} = -8200$ нТл, а максимальное отрицательное значение $Z_{\text{GSM}} = -47391$ нТл. Расчеты $M_{L\text{max}}$ для территории объекта «Ульба» показали:

$$\text{вариант 1: } M_{L\text{max}} = \{1,4 + 2,46 \text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\} / 1,8 = \\ = (1,4 + 2,46 \text{Log } 8200) / 1,8 = 6,1,$$

$$\text{вариант 2: } M_{L\text{max}} = \{1,4 + 2,46 \text{Log}[\text{abs}(Z_{\text{GSM}})]\} / 1,8 = \\ = (1,4 + 2,46 \text{Log } 47391) / 1,8 = 7,2. \quad (6)$$

Карта потенциала сейсмогенерирующих зон Восточно-Казахстанской области (рисунок 8) показывает, что максимально возможная магнитуда землетрясения на территории объекта «Ульба» ($50^\circ 15' \text{ N}$; $83^\circ 22' \text{ E}$) равна $\sim 6,0$, что близко совпадает с первым вариантом альтернативной оценки максимально возможной магнитуды $M_{L\text{max}} = 6,1$ в выражении (6). То есть, на этой территории также реализуется вариант 1, при котором вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 4,5$ еще достаточно высокая. Аналогичные расчеты величины $M_{L\text{max}}$, проведенные для территории г. Семипалатинск ($50,43^\circ \text{ N}$, $80,26^\circ \text{ E}$) также показали, что здесь значения Z_{GSM} всегда отрицательные, что говорит об относительно спокойной сейсмической активности региона. Минимальное отрицательное значение $Z_{\text{GSM}} = -5649$ нТл, а максималь-

**ТЕСТИРОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЗОН
ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

ное отрицательное значение $Z_{GSM} = -46682$ нТл, что приводит к следующим результатам расчета M_{Lmax} на территории г. Семипалатинск:

$$\begin{aligned} \text{вариант 1: } M_{Lmax} &= \{1,4 + 2,46 \text{ Log}[abs(Z_{GSM})]\} / 1,8 = \\ &= (1,4 + 2,46 \text{ Log } 5649) / 1,8 = 5,9, \\ \text{вариант 2: } M_{Lmax} &= \{1,4 + 2,46 \text{ Log}[abs(Z_{GSM})]\} / 1,8 = \\ &= (1,4 + 2,46 \text{ Log } 46682) / 1,8 = 7,16. \end{aligned} \quad (7)$$

То есть, при оценке сейсмopotенциала по геомагнитным данным на территории г. Семипалатинск тоже реализуется вариант 1, при котором, в соответствии с данными на рисунке 3, вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 4,5$ в несколько раз выше, чем для варианта 2.

Противоположный результат получился при оценке по геомагнитным данным сейсмopotенциала на территории эпицентра Зайсанского землетрясе-

ния, произошедшего 14 июня 1990 г. в 12,79 час. по времени на Гринвичском меридиане с магнитудой $M=6,6$, координатами эпицентра $47,87^\circ N$, $85,08^\circ E$, на глубине 57 км. На этой территории значения Z_{GSM} тоже всегда отрицательные, что может говорить об относительно спокойной сейсмической активности региона. Здесь, минимальное отрицательное значение $Z_{GSM} = -1301$ нТл, а максимальное отрицательное значение $Z_{GSM} = -43683$ нТл, что приводит к следующим результатам расчета M_{Lmax} на территории эпицентра Зайсанского $M=6,6$ землетрясения:

$$\begin{aligned} \text{вариант 1: } M_{Lmax} &= \{1,4 + 2,46 \text{ Log}[abs(Z_{GSM})]\} / 1,8 = \\ &= (1,4 + 2,46 \text{ Log } 1301) / 1,8 = 5,03, \\ \text{вариант 2: } M_{Lmax} &= \{1,4 + 2,46 \text{ Log}[abs(Z_{GSM})]\} / 1,8 = \\ &= (1,4 + 2,46 \text{ Log } 43683) / 1,8 = 7,12. \end{aligned} \quad (8)$$

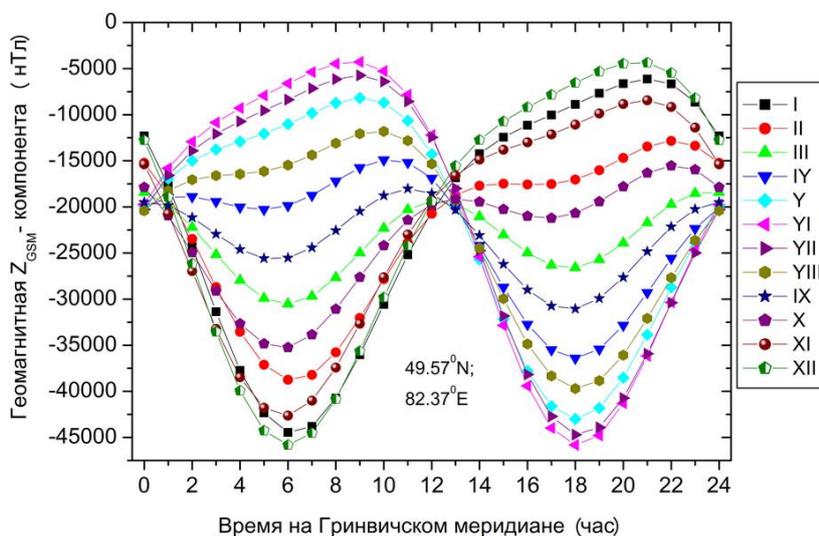


Рисунок 6. Сезонно-суточные вариации геомагнитной Z_{GSM} -компоненты на территории г. Усть-Каменогорск ($49,57^\circ N$, $82,73^\circ E$)

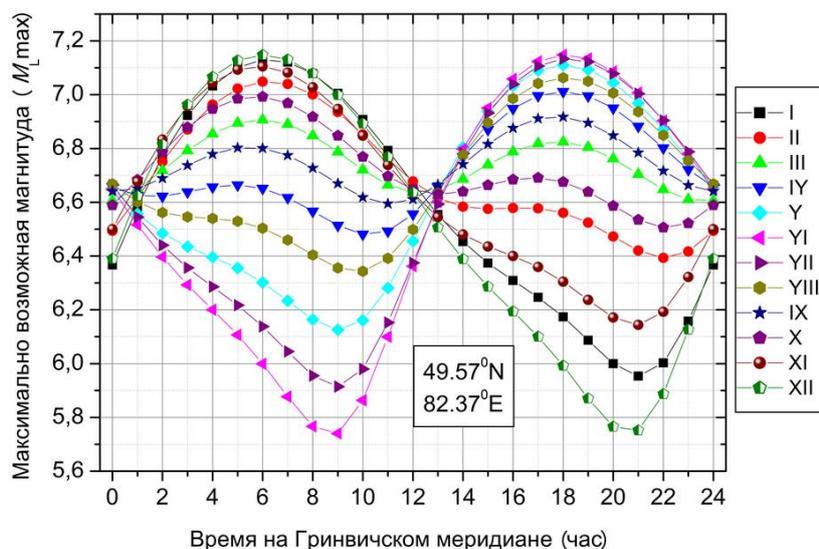


Рисунок 7. Сезонно-суточные вариации максимально возможной магнитуды землетрясений M_{Lmax} на территории г. Усть-Каменогорск ($49,57^\circ N$, $82,73^\circ E$)

**ТЕСТИРОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЗОН
ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

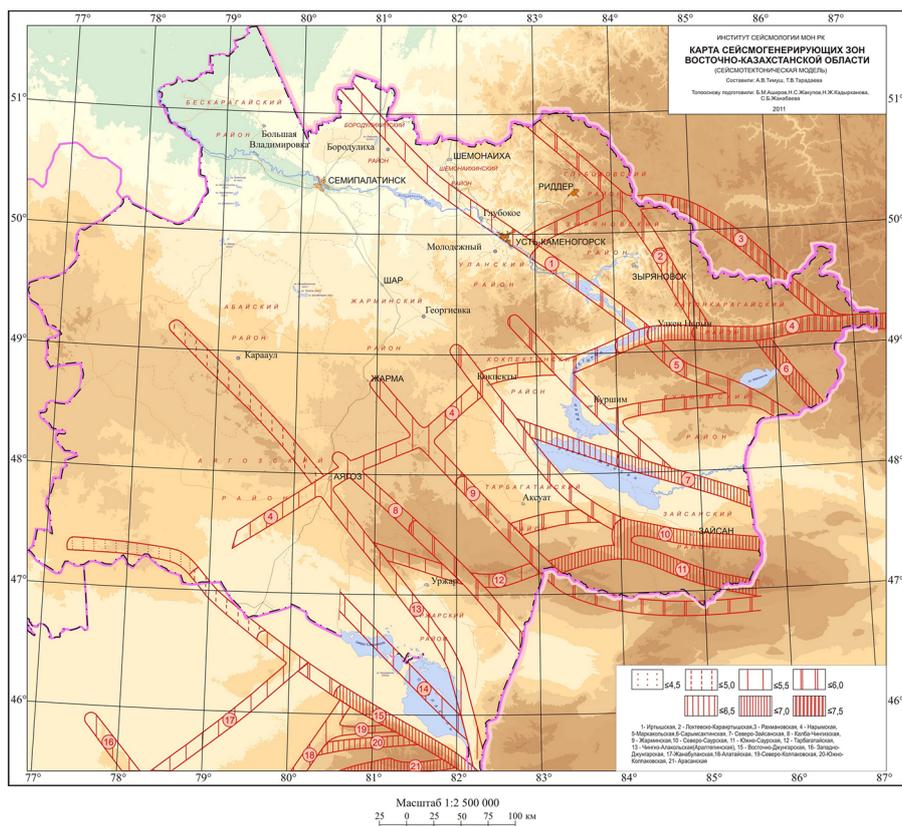


Рисунок 8. Карта потенциала сейсмогенерирующих зон (сейсмотектоническая модель) Восточно-Казакстанской области

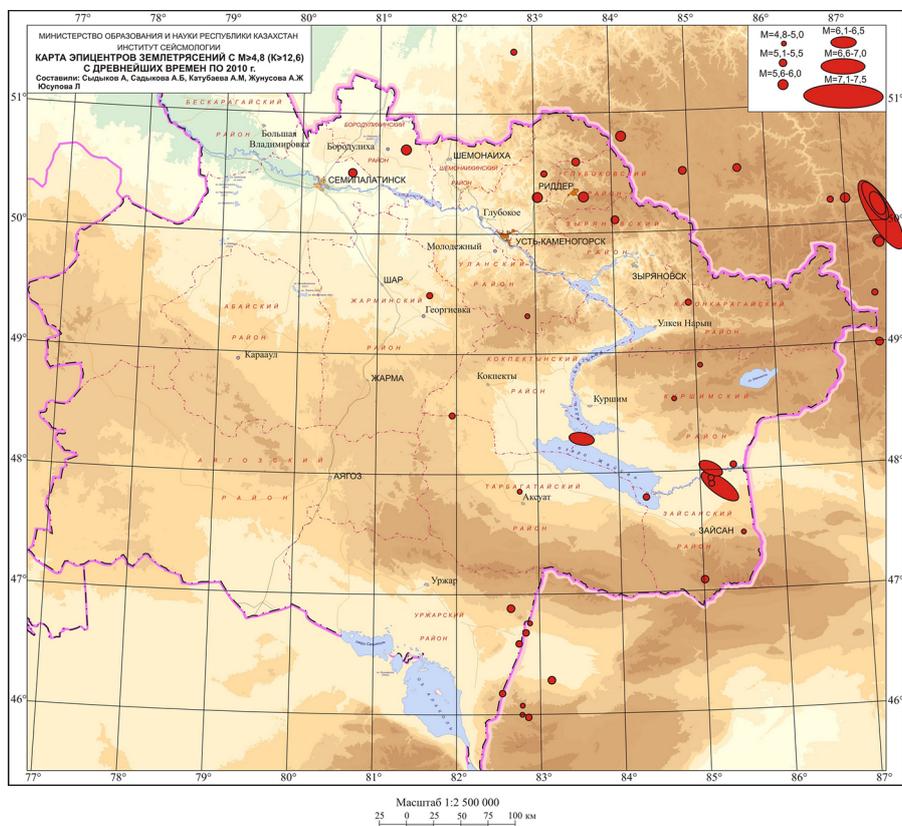


Рисунок 9. Карта эпицентров землетрясений с $M \geq 4,8$ ($K \geq 12,6$), произошедших на территории Восточно-Казакстанской области с древнейших времен по 2010 г.

Если вновь обратиться к рисунку 3, где приведена гистограмма распределения числа произошедших на планете землетрясений в зависимости от величины Z_{GSM} , то можно увидеть, что в течение 38 лет (1973–2010) в географических точках со значением $Z_{GSM} = -1301$ нТл, произошло ~4900 землетрясений с $M \geq 4,5$, а в точках со значением $Z_{GSM} = -43683$ нТл, таких событий произошло ~700, т.е., приблизительно в 7 раз меньше. Исходя из этой глобальной статистики, следовало бы ожидать, что сейсмopotенциал в районе эпицентра Зайсанского землетрясения скорее должен быть $M_{Lmax} \sim 5,0$, как показывает вариант 1 в расчетах (8). Однако, карта потенциала сейсмогенерирующих зон (рисунок 8) тоже показывает, что сейсмopotенциал в районе Зайсанского $M=6,6$ землетрясения более высокий, чем в других районах ВКО. Здесь расположена сейсмогенерирующая зона № 7, сейсмopotенциал которой $M \leq 7,0$, что достаточно близко совпадает с величиной $M_{Lmax} = 7,12$ в расчетах (8). С другой стороны, если рассмотреть карту эпицентров землетрясений с $M \geq 4,8$ с древнейших времен по 2010 г. (рисунок 9), то становится очевидным, что в величину потенциала сейсмогенерирующей зоны № 7 внесли основной вклад два землетрясения, произошедшие здесь в 1990 г.: с $M=6,6$, о котором уже сказано, и с $M=6,2$, произошедшим 3 августа 1990 г. в 09,25 час по времени на Гринвичском меридиане с координатами эпицентра $47,96^\circ$ N, $84,96^\circ$ E, на меньшей глубине (33 км). В этой связи можно предположить, что к 1990 г. на территории Зайсан сложились такие тектонические условия, которые обеспечили возможность возникновения здесь землетрясения с $M=6,6$ и возможность реализации варианта 2 в расчетах (8), вероятность которого по статистике в несколько раз меньше, чем для варианта 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На нескольких территориях Восточно-Казахстанской области (Усть-Каменогорск, Семипалатинск, объект «Ульба», Зайсан) рассчитаны значения сейсмического потенциала (максимально возможной магнитуды землетрясения M_{max}) по геомагнитным данным - значениям геомагнитной Z_{GSM} - компоненты в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат (GSM). В принципе, идея использования данных о главном геомагнитном поле при исследовании вариаций сейсмичности, не нова. Так, в [33] показано, что на сейсмоактивных территориях Австралии, Японии, Китая, долгопериодные (вековые) вариации количества землетрясений коррелирует с вековыми вариациями горизонтальной компоненты геомагнитного поля, а в [34] обнаружена геомагнитная сопряженность между сеймотектоническими структурами в северном и южном полушариях Земли.

Рассчитанные нами по геомагнитным данным значения сейсмopotенциала на территории Восточно-Казахстанской области были сопоставлены с данными о потенциале сейсмогенерирующих зон, полученным по сейсмологическим, геолого-геофизичес-

ким данным и результатам дешифрирования космонимков. Показано, что для территорий Усть-Каменогорска, Семипалатинска, и площадки объекта «Ульба» имеет место удовлетворительное согласие между оценками сейсмopotенциала разными способами, но наблюдается серьезное расхождение для территории Зайсан. По данным о геомагнитном поле, наиболее вероятное значение сейсмopotенциала на этой территории может находиться в пределах $M_{max} \sim 5$, а по сейсмологическим данным оно составляет $M_{max} \sim 7$. Поскольку при оценке M_{max} на этой территории по сейсмологическим данным основной вклад внесли два неожиданно сильных Зайсанских землетрясения: $M=6,6$, 14 июня 1990 г. и $M=6,2$, 3 августа 1990 г. [35], возникает вопрос – не могли ли эти события иметь наведенную (индуцированную) природу и быть частично или полностью следствием некоей техногенной деятельности на территории Восточно-Казахстанской области или в соседних регионах, поскольку, как показано, например, для территории Западной Индии [36], наведенная сейсмичность может мигрировать в пространстве. Возможно, дальнейшие исследования смогут пролить свет на этот вопрос.

ЛИТЕРАТУРА

1. National Space Weather Program. Strategic Plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. Washington DC. August. 1995. <http://www.ofcm.gov/nswp-sp/pdf/NSWP-SP-1995-scan.pdf>
2. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2005. – Vol.67. – P. 1259–1268.
3. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А., Партасарати С. Акустическое возмущение от подземного ядерного взрыва как источник электростатической турбулентности в магнитосфере. // Докл. АН СССР. –1990. –Т. 313, (3). – P. 568–574.
4. Selected Papers of MAGDAS for ISWI / MAGDAS School on Litho-Space Weather <http://www.serf.kyushu-u.ac.jp/news/MAGDASSchool2011>
5. Love J.J., Thomas J.N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // Geophysical Research Letters. – 2013. – Vol. 40(6). – P. 1165–1170. <https://doi.org/10.1002/grl.50211>
6. Guglielmi, A.V., Klain, B.I. On the influence of the Sun on the seismicity of the Earth // Sol.-Terr. Phys. – 2020. – Vol. 6. – No. 1. –P. 111–115. <https://doi.org/10.12737/szf-61202010>.
7. Адушкин В.В., Спивак А.А. Проблемы взаимодействия геосфер и физических полей в приповерхностной геофизике // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 4–15. – <https://doi.org/10.31857/S0002-3337201914-15>
8. Pulinet, S. and D. Ouzounov. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // J. Asian Earth Sci. – 2011. – Vol. 41. – P. 371–382.

9. Сытинский А.Д. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // ДАН СССР. – 1973. – Т. 208. – № 5. – С. 1078–1081.
10. Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. – 1998. – № 7. – С. 85–90.
11. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. – 2001. – № 11. – С. 62–72.
12. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 3–15.
13. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 3. – С. 63–75.
14. Guglielmi, A.V., O.D. Zotov. On geoseismic noise and helioseismic oscillations // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2021. – Vol. 57. – № 4. – С. 567–572. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040050>
15. Ruzhin Yu., Novikov V. The response of global seismicity to solar flares of September, 2017 // *International Journal of Electronics and Applied Research*. – 2018. – Vol. 5. – No. 2. – P. 1–10.
16. Ружич В.В., Левина Е.А. Особенности распределения сейсмической активности в разных регионах Земли по фазам 11-летнего солнечного цикла // *Солнечно-земная физика*. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 116–125. <https://doi.org/10.12737/szf-61202011>
17. Anagnostopoulos, G., Spyrogrou, I., Rigas, A., Preka-Papadema, P., Mavromichalaki, H., Kiosses, I. The Sun as a Significant Agent Provoking Earthquakes // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* – 2021. – Vol. 230. – P. 287–333. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000266-2>
18. Хачикян Г.Я. К вопросу о лито-космической погоде. Материалы всероссийской конференции с международным участием “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. – 2020. Москва, (5–9 октября 2020). С. 124–129. https://ifz.ru/documents/lab204/sborniki_konferency/5_TK.pdf
19. Borovsky J.E. and Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Т. 111. – С. A07S08.
20. Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // *Солнечно-земная физика*. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 98–103. <https://doi.org/10.12737/5694>
21. Baker D. N., Erickson P. J., Fennell J. F., Foster J. C., Jaynes A. N., Verronen P. T. Space Weather Effects in the Earth’s Radiation Belts // *Space Science Reviews*. – 2018. 60 p. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
22. Dungey, J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // *Physical Review Letters*. – 1961. – V.6 (2). P. 47–48. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
23. Russell C.T. Reconnection in Planetary Magnetospheres // *Advances in Space Research*. – 2002. – Vol. 29. – No. 7. – P. 1045–1052.
24. Khachikyan G., Inchin A., and A. Lozbin. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system // *International Journal of Geosciences*. – 2012. – Vol. 3. – № 5. – P. 1084–1088. <http://www.scirp.org/journal/ijg>
25. Russell C.T. Geophysical Coordinate Transformations // *Cosmic Electrodynamics*. – 1971. – Vol. 2. – P. 184–196.
26. Global NEIC catalogue 1973–2010. http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html
27. The International Geomagnetic Reference Field model. <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>
28. Khachikyan G. Ya., A.S. Inchin. The use of a geocentric solar-magnetosphere coordinate system for the study of earth’s seismicity. In the book: *Applied space research in Kazakhstan*. Ed.: T.A. Musabaev, Zh.Sh. Zhantayev. ISBN 968-601-290-022-4. – 2010. – P. 143–149 (in Russian).
29. Tsyganenko N.A., “Geopack: A Set of Fortran Subroutines for Computations of the Geomagnetic Field in the Earth’s Magnetosphere” 2008. <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>
30. Хачикян Г.Я., Садыкова А.Б., Стихарная Г.Г. Об оценке частоты повторяемости и силы землетрясений на основе геомагнитной ZGSM компоненты (на примере Алматинского региона) // *Вестник Национальной Академии Наук Республики Казахстан*. – 2015. – № 2. – С. 101–106.
31. Rautian, T. G. Energy of earthquakes. In *Methods for the Detailed Study of Seismicity*, ed. Y.V. Riznichenko, – 1960. – С. 75–114. Moscow: Izdatel’stvo Akademii Nauk SSSR (in Russian).
32. Хачикян Г.Я., А.Б. Садыкова, А.С. Инчин. Оценка сейсмического потенциала при проектировании ответственных сооружений в регионах с дефицитом информации о режиме сейсмичности. Материалы 14-ой научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика». – 2018. Алматы, (23–27 апреля 2018). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91645>
33. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2003. – Vol. 3 (3/4). – P. 171–177. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-171-2003>
34. Khachikyan G.Ya., Zhakupov N.S., Kadyrkhanova N.Zh. Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2013. – Vol. 4 (2). – P. 187–195. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0097>
35. Нурмагамбетов А. Зайсанское землетрясение 14 июня 1990 г. / А. Нурмагамбетов, А. Сыдыков [и др.] // *Землетрясения в СССР в 1990 г.* – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – С. 54–60.
36. Смирнов В.Б., В. О. Михайлов, А. В. Пономарев, К. Arora, R. K. Chadha, D. Srinagesh, М. Г. Потанина. О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия // *Физика Земли*. – 2018. – No. 4. – С. 100–109.

REFERENCES

1. National Space Weather Program. Strategic Plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. Washington DC. August. 1995. <http://www.ofcm.gov/nswp-sp/pdf/NSWP-SP-1995-scan.pdf>
2. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2005. – Vol. 67. – P. 1259–1268.

3. Gokhberg M.B., Pilipenko V.A., Pokhotelov O.A., Partasarati S. Acoustic radiation from an underground explosion as a source of electrostatic turbulence in the magnetosphere // *Rep. Academy of Sciences of the USSR*. – 1990. – Vol. 313, (3). – P. 568–574.
4. Selected Papers of MAGDAS for ISWI / MAGDAS School on Litho-Space Weather. <http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/news/MAGDASSchool2011>
5. Love J.J., Thomas J.N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – Vol.40(6). – P. 1165–1170. <https://doi.org/10.1002/grl.50211>
6. Guglielmi, A.V., Klain, B.I. On the influence of the Sun on the seismicity of the Earth // *Sol.-Terr. Phys.* – 2020. – Vol. 6. – No.1. – P. 111–115. – <https://doi.org/10.12737/szf-61202010>
7. Adushkin V.V., Spivak A.A. Problems of interaction of geospheres and physical fields in near-surface geophysics // *Physics of the Earth*. – 2019. – No. 1. – P. 4–15. <https://doi.org/10.31857/S0002-3337201914-15>
8. Pulinets, S. and D. Ouzounov. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.* – 2011. – Vol. 41. – P. 371–382.
9. Sytinsky A.D. On the influence of solar activity on the seismicity of the Earth // *DAN USSR*. – 1973. – Vol. 208. – No. 5. – P. 1078–1081.
10. Sobolev G.A., Shestopalov I.P., Kharin E.P. Geoeffective solar flares and seismic activity of the Earth // *Physics of the Earth*. – 1998. – No. 7. – P. 85–90.
11. Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Kharin E.P. On the connection between seismicity and magnetic storms // *Physics of the Earth*. – 2001. – No. 11. – P. 62–72.
12. Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A. On the possible influence of magnetic storms on seismicity // *Physics of the Earth*. – 2002. – No. 4. – P. 3–15.
13. Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A. Influence of magnetic storms with a sudden onset on seismicity in various regions // *Vulkanology and seismology*. – 2004. – No. 3. P. 63–75.
14. Guglielmi, A.V., O.D. Zotov. On geoseismic noise and helioseismic oscillations // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2021. – Vol. 57. – No. 4. – P. 567–572. – <https://doi.org/10.31857/S0002333721040050>
15. Ruzhin Yu., Novikov V. The response of global seismicity to solar flares of September, 2017 // *International Journal of Electronics and Applied Research*. – 2018. – Vol. 5. – No 2. – P. 1–10.
16. Ruzhich V.V., Levina E.A. Features of the distribution of seismic activity in different regions of the Earth by phases of the 11-year solar cycle // *Solnechno-zemnaya physics*. – 2020. – T. 6. – No. 1. – P. 116–125. <https://doi.org/10.12737/szf-61202011>
17. Anagnostopoulos, G., Spyroglou, I., Rigas, A., Preka-Papadema, P., Mavromichalaki, H., Kiosses, I. The Sun as a Significant Agent Provoking Earthquakes // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* – 2021. – Vol. 230. – P.287–333. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000266-2>
18. Khachikyan G.Ya. On the issue of litho-space weather. Proceedings of the Russian Conference with International Participation “Tectonophysics and Topical Issues of the Earth Sciences”. – 2020. Moscow, (October 5–9, 2020). P. 124–129. https://ifz.ru/documents/lab204/sborniki_konferency/5_TK.pdf
19. Borovsky J.E. and Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // *J. Geophys. Res.* — 2006. — T. 111. — C. A07S08.
20. Guglielmi A.V., Lavrov I.P., Sobisevich A.L. Sudden onset of magnetic storms and earthquakes // *Solar-terrestrial physics*. – 2015. – Vol. 1. – No. 1. – P. 98–103. <https://doi.org/10.12737/5694>
21. Baker D. N., Erickson P. J., Fennell J. F., Foster J. C., Jaynes A. N., Verronen P. T. Space Weather Effects in the Earth’s Radiation Belts // *Space Science Reviews*. – 2018. 60 p. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
22. Dungey, J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // *Physical Review Letters*. – 1961. – V. 6 (2). – P. 47–48. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
23. Russell C.T. Reconnection in Planetary Magnetospheres // *Advances in Space Research*. – 2002. – Vol. 29. – No. 7. – P. 1045–1052.
24. Khachikyan G., Inchin A., and A. Lozbin. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system // *International Journal of Geosciences*. – 2012. – Vol. 3. – № 5. – P. 1084–1088. – <http://www.scirp.org/journal/ijg>
25. Russell C.T. Geophysical Coordinate Transformations // *Cosmic Electrodynamics*. – 1971. – Vol. 2. – P. 184–196.
26. Global NEIC catalogue 1973–2010. http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html
27. The International Geomagnetic Reference Field model. <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>
28. Khachikyan G. Ya., A.S. Inchin. The use of a geocentric solar-magnetosphere coordinate system for the study of earth’s seismicity. In the book: *Applied space research in Kazakhstan*. Ed.: T.A. Musabaev, Zh.Sh. Zhantayev. ISBN 968-601-290-022-4. – 2010. – P. 143–149 (in Russian).
29. Tsyganenko N.A., “Geopack: A Set of Fortran Subroutines for Computations of the Geomagnetic Field in the Earth’s Magnetosphere” 2008. <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>
30. Khachikyan G.Ya., Sadykova A.B., Stikharnaya G.G. On the assessment of the frequency and strength of earthquakes based on the geomagnetic ZGSM component (on the example of the Almaty region) // *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. – 2015. – No. 2. – P. 101–106.
31. Rautian, T. G. Energy of earthquakes. In *Methods for the Detailed Study of Seismicity*, ed. Y.V. Riznichenko, – 1960. – P. 75–114. Moscow: Izdatel’stvo Akademii Nauk SSSR (in Russian).
32. Khachikyan G.Ya., A.B. Sadykova, A.S. Inchin. Assessment of seismic potential in the design of critical structures in regions with a lack of information on the seismicity regime. Materials of the 14th scientific-practical conference and exhibition “Engineering and mine geophysics”. – 2018. Almaty, (April 23–27, 2018). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91645>
33. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2003. – Vol. 3 (3/4). – P. 171–177. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-171-2003>
34. Khachikyan G.Ya., Zhakupov N.S., Kadyrkanova N.Zh. Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2013. – Vol. 4 (2). – P. 187–195. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0097>

35. Nurmagambetov A. Zaisan earthquake on June 14, 1990 / A. Nurmagambetov, A. Sydykov [et al.] // Earthquakes in the USSR in 1990 – Moscow: OIFZ RAS, 1996. – P. 54–60.

36. V. B. Smirnov, V. O. Mikhailov, A. V. Ponomarev, K. Arora, R. K. Chadha, D. Srinagesh, and M. G. Potanina. On the dynamics of seasonal components of induced seismicity in the Koina-Varna region, Western India // Physics of the Earth. – 2018. – No. 4. – P. 100–109.

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ГЕОМАГНИТТІ ДЕРЕКТЕР БОЙЫНША СЕЙСМО- ГЕНЕРАЦИЯЛАЙТЫН АЙМАҚТАРДЫҢ ӘЛЕУЕТІН АНЫҚТАУ ТӘСІЛІН ТЕСТІЛЕУ

А.Б. Садықова, Г.Я. Хачикян

Сейсмология институты, Алматы, Қазақстан

Шығыс Қазақстан облысының бірнеше аумағында (Өскемен, Семей, «Үлбі» объектісі, Зайсан) геомагнитті деректер: геоцентрлік күн-магнитосфералық координаттар жүйесінде (GSM) есептелген геомагнитті Z-компонентінің мәндері бойынша сейсмикалық әлеуетті (жерсілкінулерінің ең жоғары мүмкін магнитудасын) есептеу әдісі тестіленді. Геомагнитті деректер бойынша сейсмикалық әлеуетті бағалауы Шығыс қазақстан облысы аумағындағы сейсмогенерациялайтын аймақтардың әлеуеті туралы сейсмологиялық, геологиялық-геофизикалық деректер және ғарыштық түсірілімдерді дешифрлеу нәтижелері бойынша алынған деректермен салыстырылды. Бағалаулар арасында екі түрлі тәсілмен қанағаттанарлық келісім алынды, бұл сейсмикалық режим туралы ақпарат тапшылығы бар өңірлерде (мүмкін уақытша сейсмикалық тыныштық режиміндегі) сейсмикалық әлеуетті бағалаудың баламалы әдісін қолдану мүмкіндігін растайды.

Түйін сөздер: жер сілкінісінің максималды мүмкін шамалары, геомагниттік өрістер, жер сілкіністері, сейсмикалық потенциал, Шығыс Қазақстан.

TESTING THE METHOD FOR DETERMINING THE POTENTIAL OF SEISMOGENERATING ZONES BY GEOMAGNETIC DATA IN THE TERRITORY OF EASTERN KAZAKHSTAN

A.B. Sadykova, G.Ya. Khachikyan

Institute of Seismology, Almaty, Kazakhstan

In certain territories of the East Kazakhstan region (Ust-Kamenogorsk, Semipalatinsk, the Ulba object, Zaisan), a method for calculating the seismic potential (maximum possible earthquake magnitude) was tested using geomagnetic data: the values of the geomagnetic Z-component calculated in the geocentric solar-magnetospheric coordinate system (GSM). Estimates of seismic potential based on geomagnetic data were compared with data on the potential of seismogenic zones in the territory of the East Kazakhstan region, obtained from seismological, geological and geophysical data and the results of interpretation of satellite images. Satisfactory agreement was obtained between the estimates by two different methods, which confirms the possibility of using an alternative method for estimating the seismic potential in regions with a deficit of information about the seismic regime (possibly, being at present in the regime of temporary seismic calm).

Keywords: maximal possible magnitude of earthquake, geomagnetic field, earthquakes, seismic potential, East Kazakhstan.