

УДК 550.385+550.348

О ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ РЕГИОНА АЛЯСКИ

© 2020 г. О.В. Козырева^{1,2}, В.А. Пилипенко^{1,2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

В геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия на сейсмичность Земли солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды (магнитные бури). Авторы попытались проверить идею о магнитной буре и наведенных ею теллурических полях и токах как триггере землетрясений для Аляски, региона с высокой сейсмичностью и мощной магнитной активностью. Методом наложенных эпох для медианных значений магнитной возмущенности относительно момента землетрясения рассмотрена статистика геомагнитных вариаций на станции *College* (США) до и после поверхностных землетрясений 2014–2016 гг. В качестве характеристики геомагнитной возмущенности использованы абсолютные значения возмущения поля $|\Delta X|$. Поскольку величина теллурических токов, индуцируемых в земной коре, пропорциональна производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля, то рассматривалось и абсолютное значение вариабельности поля $|dX/dt|$. Статистически значимых отклонений кривых за десять дней до землетрясения не обнаружено. С другой стороны, самые интенсивные геомагнитные возмущения происходят во время суббурь, развивающихся как во время магнитной бури, так и вне неё. Было сопоставлено количество землетрясений разных классов до и после начала суббурь во временном интервале 10 ч, но явного изменения сейсмичности после суббурь не обнаружено. Полученные результаты не подтвердили гипотезу о магнитной буре и суббуре как возможных триггерах землетрясений для региона Аляски. Тем не менее, это заключение нельзя распространять на возможность триггерного воздействия мощных электромагнитных импульсов на локальную сейсмичность. Данная заметка рассматривается как приглашение космофизиков и сейсмологов к совместному обсуждению триггерной сейсмичности.

Ключевые слова: триггеры землетрясений, электромагнитные предвестники землетрясений, магнитные бури, геомагнитные пульсации.

Введение: магнитные бури как триггер землетрясений

В геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды (магнитных бурь) на сейсмичность Земли. В таких ситуациях, когда накопленное напряжение вдоль разлома находится вблизи критического уровня, даже слабое внешнее воздействие может спровоцировать неустойчивость литосферных блоков и служить триггером землетрясения. В ряде работ утверждалось, что как магнитные бури с внезапным началом *SC* [Соболев, Закржевская, Харин, 2001; Закржевская, Соболев, 2002], так и вызывающие их солнечные вспышки [Барсуков, 1991; Соболев, Шестопалов, Харин, 1998; Сычева, Богомолов, Сычев, 2011] приводят к заметным изменениям сейсмичности, на основе чего делалось предположение о триггерном механизме этого явления. В одной из названных работ [Соболев, Закржевская, Харин, 2001] сообщалось, что после магнитных бурь с *SC* количество слабых землетрясений в Киргизии возрастало на 3–4 события в день. Нормированная разница между суммарным числом событий до

и после бури показывает, что в среднем сейсмичность возрастает на вторые–седьмые сутки после бури. Обнаружено увеличение суточного числа местных землетрясений в Киргизии на вторые сутки после солнечной вспышки [Сычева, Богомолов, Сычев, 2011].

Тенденцию некоторого увеличения числа землетрясений после бурь с SC отметили авторы работы [Кузнецова и др., 2005], использовавшие при изучении связи изменений геомагнитного поля с сейсмическим режимом Карпат ту же методику, что и в [За-кржевская, Соболев, 2002]. Утверждение о том, что более 90 % толчков в зоне сосредоточенной сейсмичности Вранча связаны с полярными суббурями, произошедшими за 1–2 дня до событий, содержится в [Бахмутов, Седова, Мозговая, 2007]; по мнению авторов этой работы, основной фактор – не столько величина геомагнитного возмущения, сколько градиент магнитного поля.

Высокие корреляционные связи между суточным ходом слабой сейсмичности и геомагнитной S_q -вариацией обнаружены и на низких широтах [Duma, Vilardo, 1998; Duma, Ruzin, 2003; Rabeh, Miranda, Milan, 2010]. Существование этих вариаций в спокойных геомагнитных условиях с небольшой величиной (порядка нескольких десятков нТл) обусловлено повышенным солнечным освещением дневной ионосферы.

Свидетельства о триггерном высвобождении накопленной в коре энергии в виде слабых землетрясений под воздействием мощных электромагнитных импульсов были замечены в Таджикистане и Киргизии при экспериментах с магнитогидродинамическим генератором (далее МГД генератор). Так, в Таджикистане облучение коры мощными электромагнитными импульсами МГД генератора вызвало заметную активизацию сейсмичности, наиболее ярко проявившуюся в верхнем 5-километровом слое [Тарасов, 1997]. При этом интенсивность потока землетрясений резко возросла через пять–шесть суток после сеансов облучения; выделение суммарной сейсмической энергии оказывалось на пять порядков выше энергии импульса [Тарасов, Тарасова, 2011]. Эти результаты подтвердились в других геолого-геофизических условиях при изучении влияния пусков МГД генератора на сейсмичность Северного Тянь-Шаня [Тарасов и др., 1999]. Позднее при использовании вместо МГД генератора конденсаторно-тиристорного источника также была обнаружена активизация сейсмичности после электромагнитного облучения [Тарасов и др., 2001]. Кроме этого, рассматриваемый эффект был прослежен при электромагнитном зондировании литосферы – он проявлялся в увеличении наклона графика повторяемости [Смирнов, Завьялов, 2012].

Принципиальная возможность инициирующего воздействия электрических импульсов на процессы микрорастрескивания была продемонстрирована при лабораторных экспериментах [Соболев, Пономарев, 2003], в ходе которых наблюдалось значимое повышение уровня акустической эмиссии образцов горных пород под нагрузкой после их облучения электромагнитными импульсами. В дальнейшем (см., например, [Богомолов, 2010]) активно изучалось влияние импульсных электромагнитных полей на режим накопления микродефектов в образцах, которые находятся в состоянии сжатия. Был выявлен прирост акустической эмиссии, отражающий процесс трещинообразования в нагруженной среде. Но даже для лабораторных экспериментов вопрос о механизме вариаций интенсивности акустической эмиссии под воздействием электрических импульсов остается невыясненным. В настоящей работе мы обсудим эти удивительные результаты и попытаемся проверить идею о магнитной буре как триггере землетрясений.

В качестве объекта исследования нами выбран находящийся на высоких геомагнитных широтах регион Аляски с высокой сейсмичностью и мощной магнитной активностью. Рассматривается статистика геомагнитных вариаций до и после слабых землетрясений 2014–2016 гг., зафиксированных на расположенной в центре Аляски магнитной обсерватории College (СМО).

Исходные данные и метод анализа

Основой исследований служил каталог сейсмических событий Геологической службы США¹, из которого для региона Аляски и Алеутских островов были отобраны сильные ($M > 5$) и слабые ($3 < M < 5$) землетрясения 2014–2016 гг. с гипоцентрами на разных глубинах – мелкие, $H < 5$ км; поверхностные на промежуточных глубинах, $H = 5–10$ км; неглубокие, $H = 10–30$ км. Всего в регионе произошло 774 слабых землетрясения, из которых 100 были мелкими, 497 – поверхностными, 177 – неглубокими; сильных землетрясений с гипоцентрами на глубинах менее 30 км в те же годы было 25. Распределение эпицентров землетрясений разных классов в регионе показано на рис. 1.

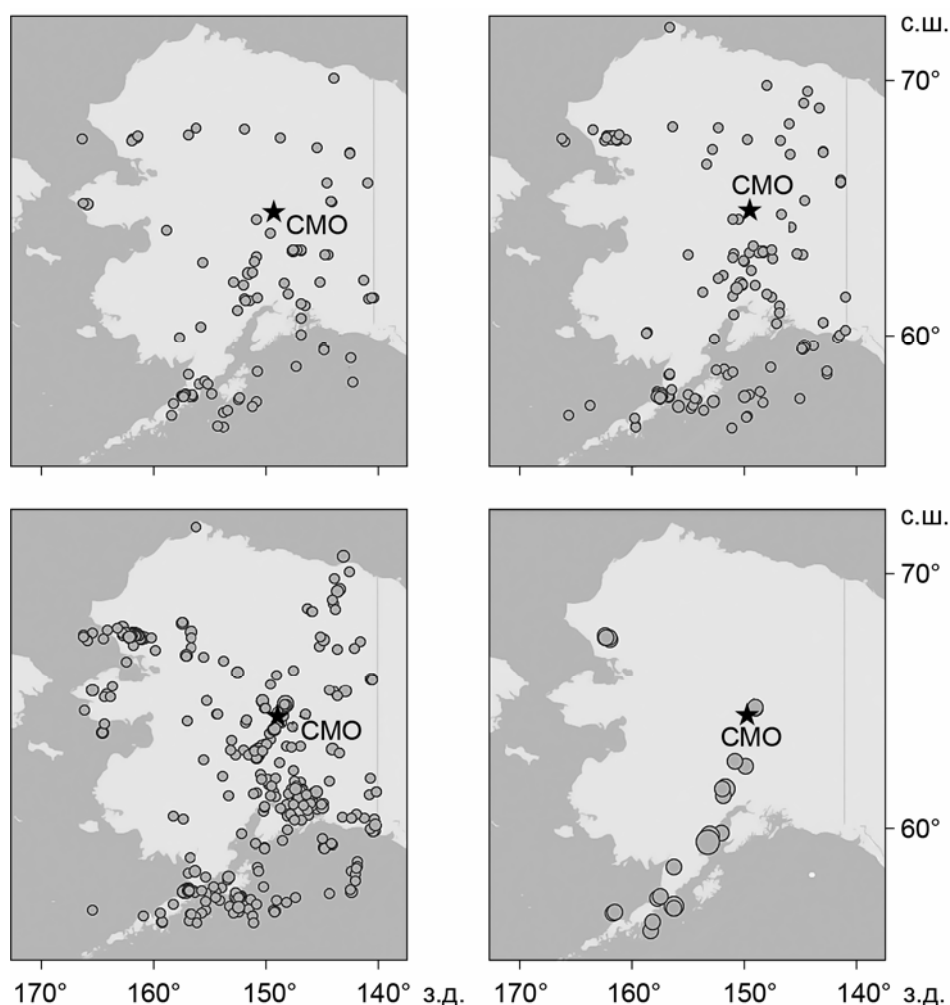


Рис. 1. Эпицентры слабых ($3 < M < 5$) землетрясений 2014–2016 гг. в регионе Аляски: мелкие землетрясения ($H < 5$ км, *вверху слева*), поверхностные ($H = 5–10$ км, *вверху справа*), неглубокие ($H = 10–30$ км, *внизу слева*). Эпицентры сильных ($M > 5$) землетрясений показаны *внизу справа*. СМО – магнитная обсерватории College (США)

Fig. 1. Epicenters of weak ($3 < M < 5$) earthquakes from 2014–2016 in the Alaska region: near surface earthquakes ($H < 5$ km, *on the top left*); surface ($H = 5–10$ km, *on the top right*), shallow ($H = 10–30$ km, *on the bottom left*). The epicenters of strong ($M > 5$) earthquakes are shown *on the bottom right*. CMO – location of the College Magnetic Observatory (USA)

¹ <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>

Для проверки представительности используемого для региона Аляски каталога было построено распределение числа землетрясений по магнитудам (рис. 2), которое, как можно видеть, вплоть до $M=3$ следует закону Гуттенберга–Рихтера. Таким образом, рассматриваемые нами события с $M \geq 3$ действительно являются представительными.

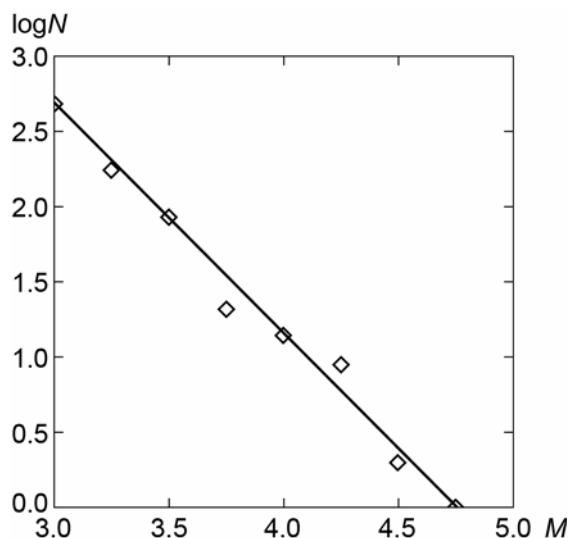


Рис. 2. Распределение по магнитудам числа землетрясений N , произошедших в регионе Аляски с $M \geq 3$. Прямая линия соответствует распределению Гуттенберга–Рихтера

Fig. 2. Distribution of the number of earthquakes N with $M \geq 3$ for the Alaska region by magnitude. The straight line corresponds to the Gutenberg–Richter distribution

В качестве характеристики глобальной буревой активности использовался среднечасовой индекс D_{st} и одноминутный индекс $SYM-H$. Помимо формализованного планетарного параметра, мы используем непосредственно данные магнитных станций. Для анализа геомагнитной возмущенности была выбрана расположенная в центре Аляски обсерватория СМО (геомагнитная широта 64.7°). Самые сильные магнитные возмущения как во время магнитных бурь, так и в небуревые периоды проявляются в зависимости от положения станции относительно центра авроральной активности либо резким уменьшением ориентированной в направлении север–юг X -компоненты поля, создаваемым западным ионосферным электроджетом, либо увеличением этой компоненты, создаваемым восточным электроджетом. Для характеристики магнитной возмущенности использовано абсолютное значение величины возмущения поля $|\Delta X|$ относительно среднего значения за день $\langle X \rangle$, т.е. $\Delta X = X - \langle X \rangle$. Поскольку величина индуцируемых в земной коре теллурических токов пропорциональна производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля $E \sim dX/dt$, то рассматривалось и абсолютное значение варибельности поля $|dX/dt|$.

Магнитная буря и землетрясения 17 марта 2015 г.

Поиски аномалий магнитного поля перед землетрясениями активно ведутся и для обнаружения возможных краткосрочных предвестников землетрясений [Гохберг, Моргунов, Похотелов, 1988]. Как правило, в литературе приводятся результаты наблюдений, относящихся к одному выбранному событию. В настоящей работе мы покажем опасность подобного подхода к поиску триггерных явлений, который может привести к ложным выводам.

Вызванная корональным выбросом массы из Солнца магнитная буря 17 марта 2015 г., при которой полярные сияния наблюдались даже на юге Европы, США и в Японии, была самой сильной в 24-м солнечном цикле. Буря в 04:45 UT предварялась

импульсом “внезапного начала” (далее SC); главная фаза бури, начавшись примерно в 06 UT, растянулась почти на 17 часов; индекс D_{st} достигал -230 нТл. В процессе развития бури отмечена серия суббуревых активизаций, во время которых авроральный AE индекс превышал 2000 нТл. Магнитосфера была сжата настолько, что геостационарная орбита с дневной стороны оказалась вне магнитосферы.

Сразу после SC в 04:47 UT на Аляске произошло слабое местное землетрясение с $M=3.0$ и гипоцентром на глубине $H=3.9$ км (рис. 3). В начале главной фазы бури резко возросла вариабельность геомагнитного поля $|dX/dt|$, и в 15:14 UT было зарегистрировано еще одно местное землетрясение с $M=3.5$ и $H=11$ км. Сопоставление магнитной возмущенности и сейсмической активности в данном случае, казалось бы, явно подтверждает эффект триггерного возбуждения слабых землетрясений сильной магнитной бурей, но существуют и другие примеры.

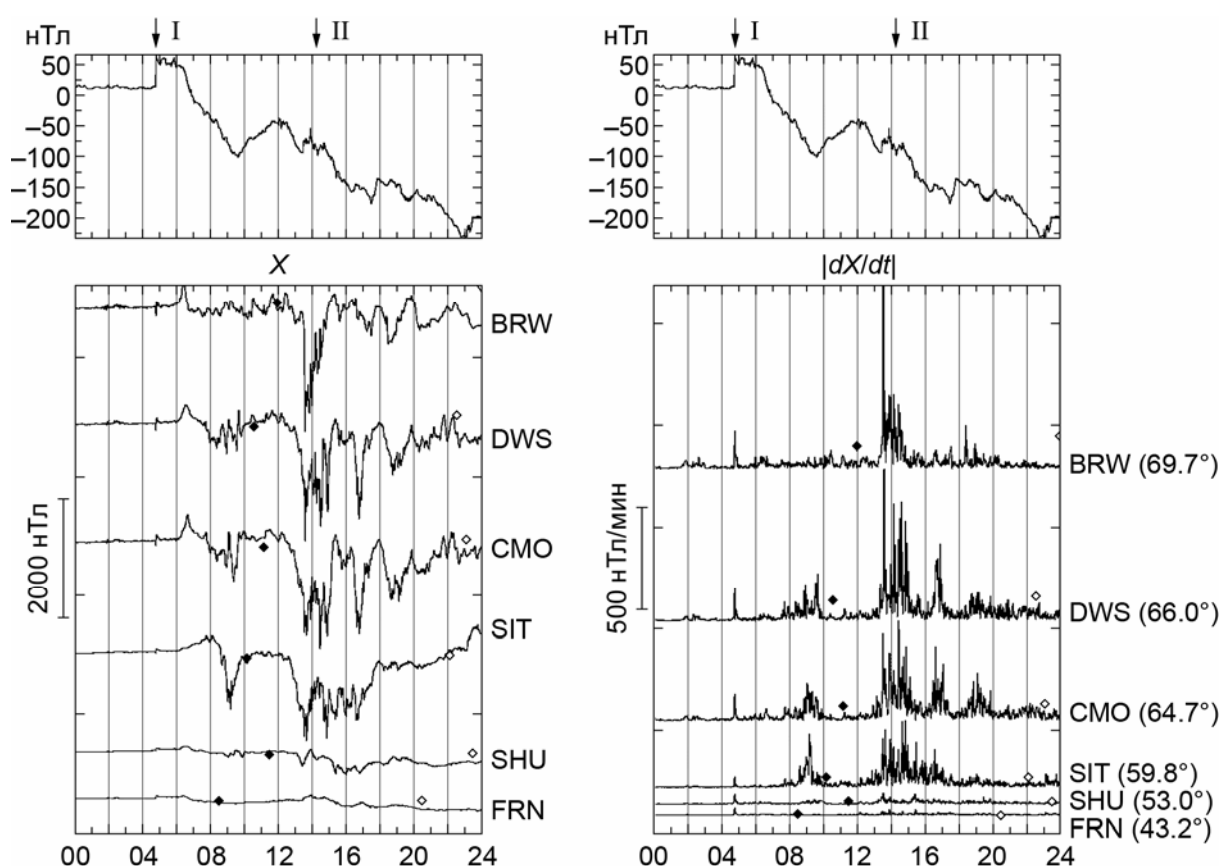


Рис. 3. Сопоставление графика $SYM-H$ индекса (вверху) с магнитограммами, записанными во время бури 17.03.2015 г. станциями, расположенными на разных широтах (левый столбец), и с графиками $|dX/dt|$ для тех же станций (правый столбец). Приведены станции *Barrow* (BRW), *Dawson* (DWS), *Sitka* (SIT), *Sumagin* (SHU), *Fresno* (FRN). Стрелками отмечены моменты местных землетрясений: I – 04:47 UT ($M=3.0$), II – 15:14 UT ($M=3.5$); ромб без заливки – полдень по MLT, с заливкой – полночь по MLT

Fig. 3. Comparison of the $SYM-H$ index plot (top) with magnetograms recorded during the storm on 17.03.2015 by stations located at different latitudes (left column) and with plots $|dX/dt|$ for the same stations (right column). The given stations are *Barrow* (BRW), *Dawson* (DWS), *Sitka* (SIT), *Sumagin* (SHU), *Fresno* (FRN). The arrows indicate the moments of local earthquakes: I – 04:47 UT ($M=3.0$), II – 15:14 UT ($M=3.5$); rhombus without filling – noon on MLT, with filling – midnight on MLT

Так, перед одним из сильнейших землетрясений последнего времени, произошедшим в 1960 г. в Чили с $M=9.5$, наблюдался высокий уровень геомагнитной возмущенности [Straser, Cataldi, Cataldi, 2015]. А перед двумя сильными землетрясениями, одно из которых произошло на Аляске (1964 г., $M=9.2$), другое на Суматре (2004 г., $M=9.1$), геомагнитные условия были спокойными. Поэтому при всей важности анализа отдельных единичных событий такой подход не дает надежных свидетельств в пользу реальности триггерных эффектов, методика поиска которых должна быть дополнена статистическими исследованиями.

Результаты статистического анализа

Статистические закономерности за три рассматриваемых года определялись методом наложенных эпох. В отличие от предшествующих работ, в качестве нулевой (реперной) точки использовался не момент SC , а момент землетрясения. Для поиска возможных геомагнитных аномалий рассматривался интервал ± 10 дней относительно нулевой точки. Вычисления выполнялись для землетрясений с разными магнитудами и глубинами гипоцентров. В соответствии с положениями математической статистики, среднее значение является адекватной мерой центральной тенденции в выборке только для случая нормального (Гауссова) распределения признака. Поскольку распределения геомагнитных возмущений отклоняются от нормального закона, то использование в методе наложенных эпох среднего значения некорректно, так как оно слишком чувствительно к выбросам. Например, всего одна сильная буря перед землетрясением может сдвинуть график в локальной области, что создаст иллюзию существования триггерного эффекта. Примером может служить сильная буря 22.06.2015 г. с $|D_{st}| \sim 200$ нТл, через два дня после которой произошло землетрясение. Поэтому для характеристики центральной тенденции в выборке нами использовалось устойчивое к выбросам медианное значение.

На приводимых ниже графиках D_{st} -индекса, $|\Delta X|$ и $|dX/dt|$, построенных методом наложенных эпох, представлены среднечасовые медианы (черные графики) и стандартные отклонения σ (серые) магнитных возмущений для каждого момента времени относительно сейсмических событий. Там же тонкой горизонтальной линией показано рассчитанное стандартное отклонение по всей 20-дневной выборке. Иногда в вариациях $|\Delta X|$ видна околосуточная периодичность, связанная с ночным усилением геомагнитной активности из-за суббурь. Если вариации магнитного поля не влияют на сейсмическую активность, то динамика интенсивности магнитных вариаций на графике до и после землетрясения будет одинакова. Если же сильные вариации геомагнитного поля служат триггером землетрясения (или его краткосрочным предвестником), то их динамика в предшествующие дни должна показывать систематическое, превышающее σ усиление возмущенности и вариабельности геомагнитного поля перед сейсмическим событием.

Рассмотрим магнитную активность перед сильными землетрясениями, произошедшими в регионе в 2014–2016 гг. (рис. 4). На графиках всех трех анализируемых параметров – D_{st} -индекса, $|\Delta X|$, $|dX/dt|$ – перед моментом сейсмического толчка не прослеживается какого-либо статистически значимого отклонения, выходящего за пределы стандартного. Небольшое (примерно на 90 нТл) увеличение амплитуды магнитных возмущений, отмечаемое за один–четыре дня до толчка (см. рис. 4, *по центру*), сопровождалось повышением среднего уровня флуктуаций геомагнитного поля $|dX/dt|$ примерно на 70 нТл/ч, но эти величины не превышают стандартного отклонения, составляющего 90 нТл и 100 нТл/ч, соответственно.

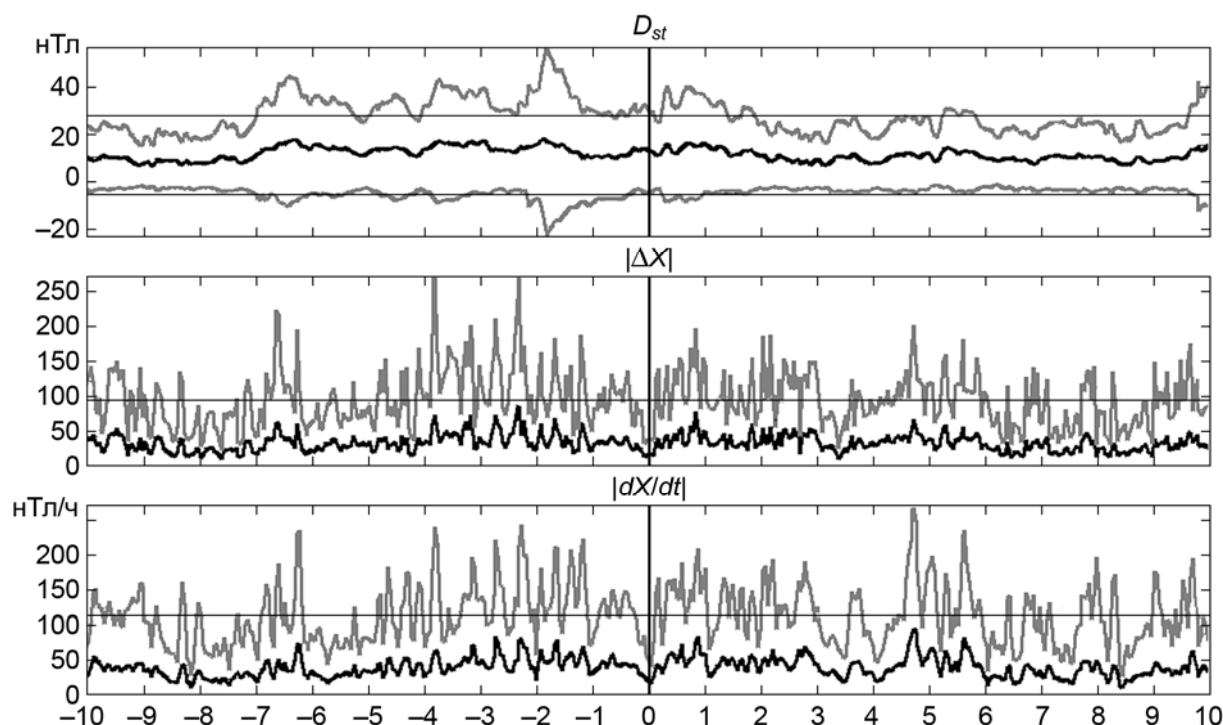


Рис. 4. Полученные методом наложенных эпох графики часовых медианных значений D_{st} индекса (вверху), $|\Delta X|$ (по центру) и $|dX/dt|$ (внизу) относительно моментов землетрясений с $M > 5$, произошедших в регионе Аляски в 2014–2016 гг. Черные графики – медианы; серые – стандартные отклонения; тонкая горизонтальная линия – стандартные отклонения по всей 20-дневной выборке. На горизонтальной оси: 0 – реперная точка (момент землетрясения), относительно которой отсчитываются анализируемые интервалы времени (дни до и после толчка)

Fig. 4. Plots of hourly median values of the D_{st} -index obtained by the superposed epoch method (top), $|\Delta X|$ (center) and $|dX/dt|$ (bottom) regarding the moments of earthquakes with $M > 5$ that occurred in the Alaska region in 2014–2016. Black curves are medians; gray – standard deviations; thin horizontal line – standard deviations for the entire 20-day sample. On the horizontal axis: 0 – reference point (moment of an earthquake), relative to which the analyzed time intervals (days before and after the shock) are counted

Рассмотрим магнитную активность перед слабыми ($3 < M < 5$) землетрясениями с разной глубиной гипоцентра. Для слабых поверхностных ($H < 5$ км) и мелких ($H = 5–10$ км) землетрясений (рис. 5, 6) различий в геомагнитной возмущенности до и после толчка не прослеживается. Перед слабыми неглубокими землетрясениями (рис. 7) изменения динамики геомагнитной возмущенности также не отмечены. Для проверки полученных закономерностей по той же методике были рассчитаны графики для дат, выбранных с помощью генератора случайных чисел. Полученные в этом случае кривые (рис. 8) оказались по своему виду примерно такими же, как и для реальных землетрясений. Иногда наблюдаемое усиление магнитных возмущений перед толчком (за пять дней) представляется случайным, поскольку не выходит за пределы стандартного отклонения.

Возможно, усреднение по часовым интервалам приводит к слишком сильному сглаживанию. Однако результаты анализа, проведенного по одноминутным значениям, тоже не обнаружили значимых аномалий. Можно допустить, что важен не средний уровень возмущений геомагнитного поля, а наличие их кратковременных экстремумов. Такая возможность была проверена построением кривых для максимальных значений в часовых интервалах, но и при этом значимых эффектов выявлено не было.

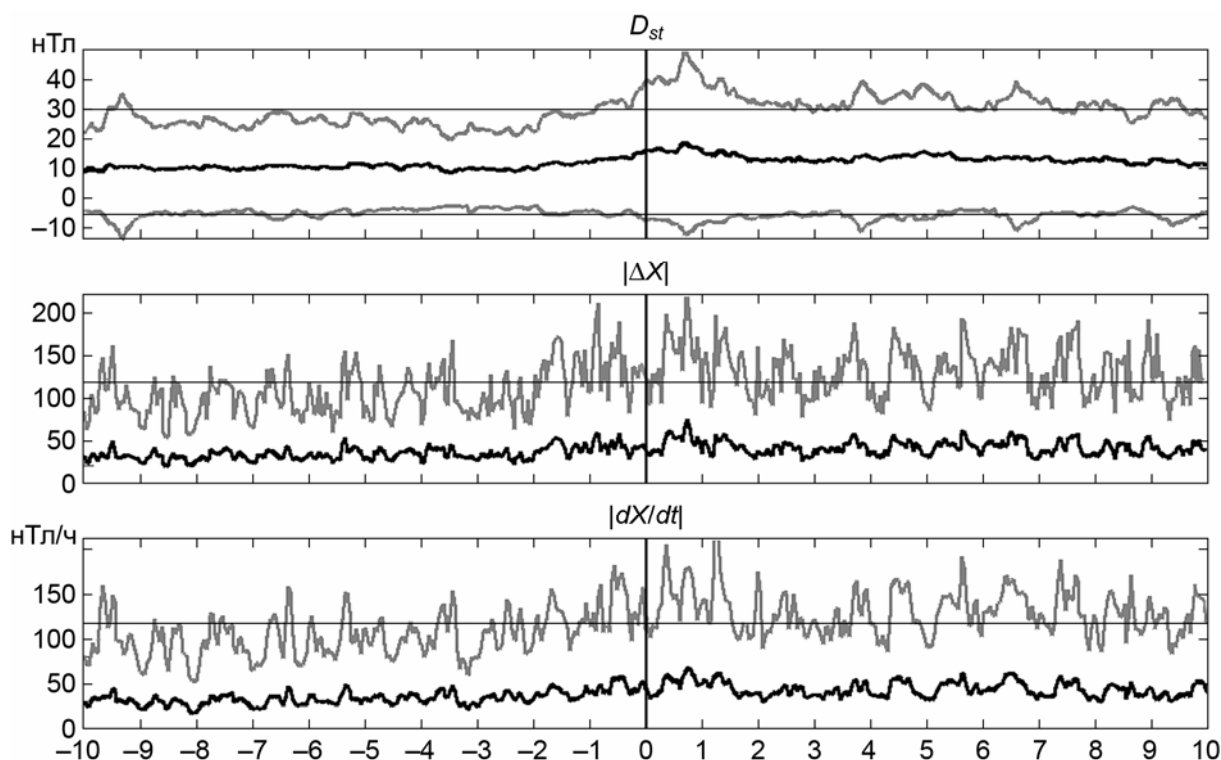


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для слабых мелких землетрясений ($3 < M < 5$, $H < 5$ км)

Fig. 5. The same as in Fig. 4, for weak small earthquakes ($3 < M < 5$, $H < 5$ km)

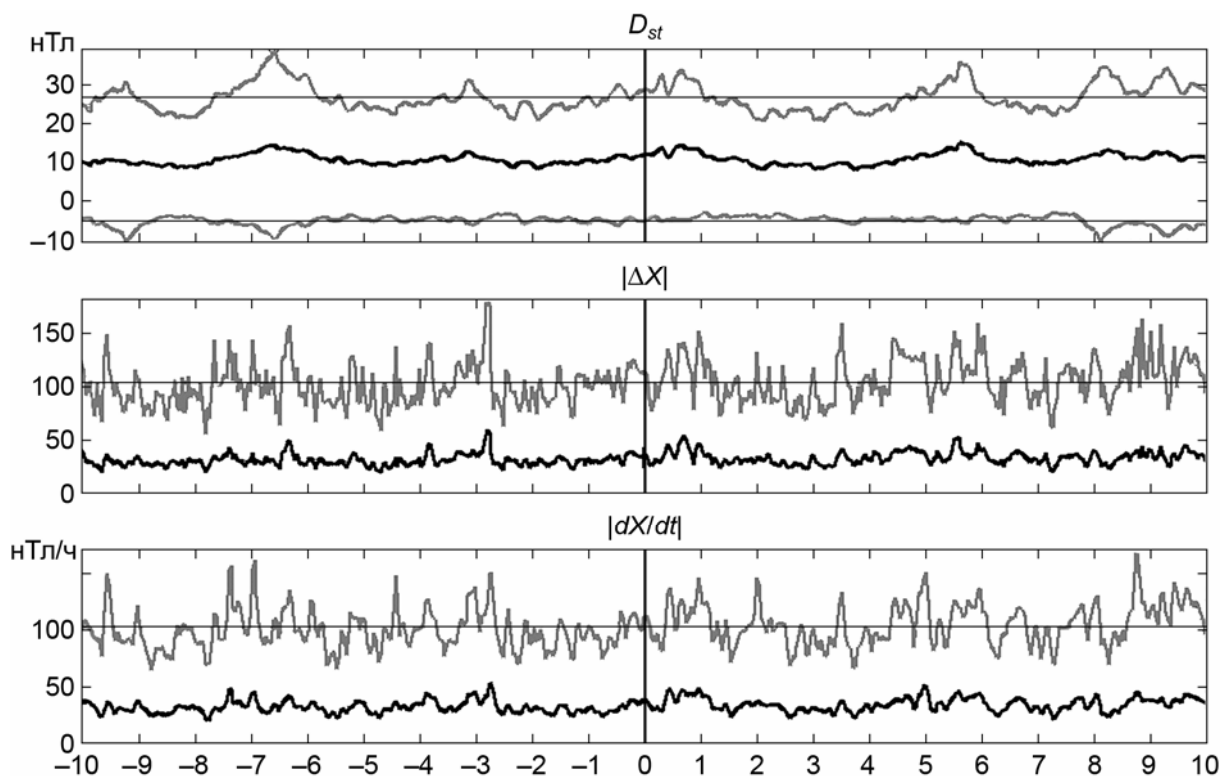


Рис. 6. То же, что на рис. 4, для слабых поверхностных землетрясений ($3 < M < 5$, $H = 5\text{--}10$ км)

Fig. 6. The same as in Fig. 4, for weak surface earthquakes ($3 < M < 5$, $H = 5\text{--}10$ km)

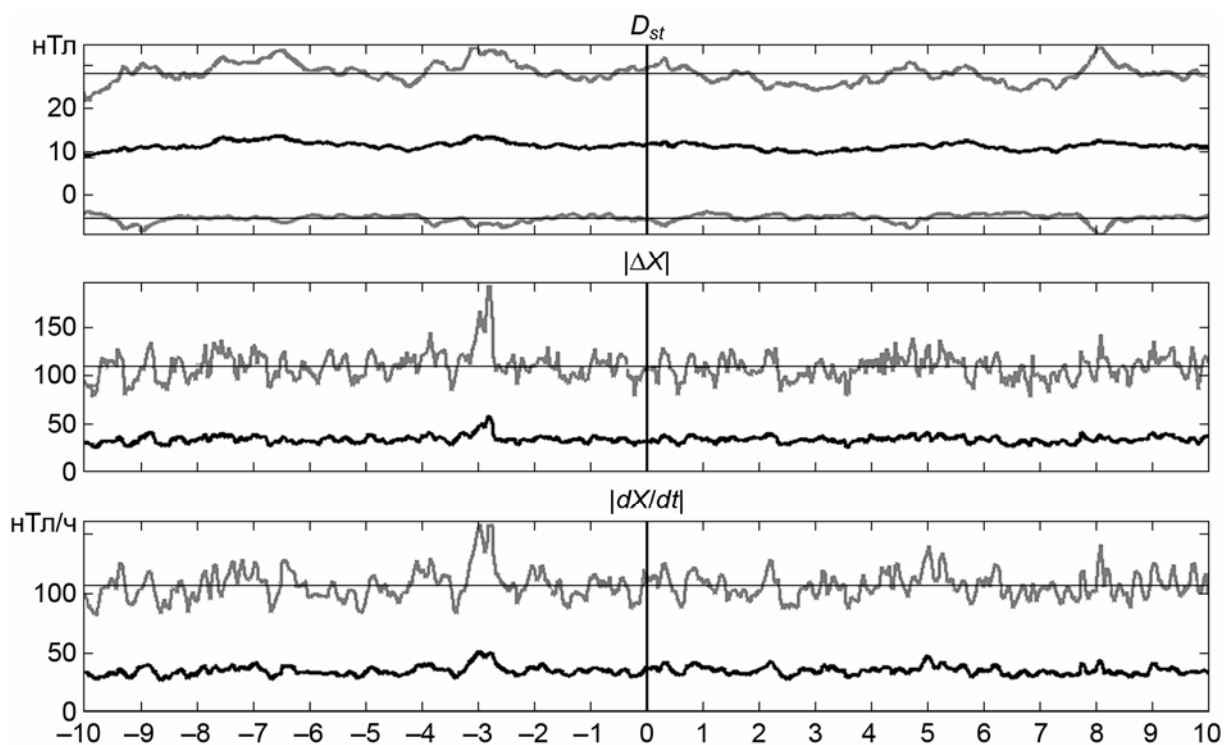


Рис. 7. То же, что на рис. 4, для слабых неглубоких землетрясений ($3 < M < 5$, $H > 10$ км)

Fig. 7. The same as in Fig. 4, for weak shallow earthquakes ($3 < M < 5$, $H > 10$ km)

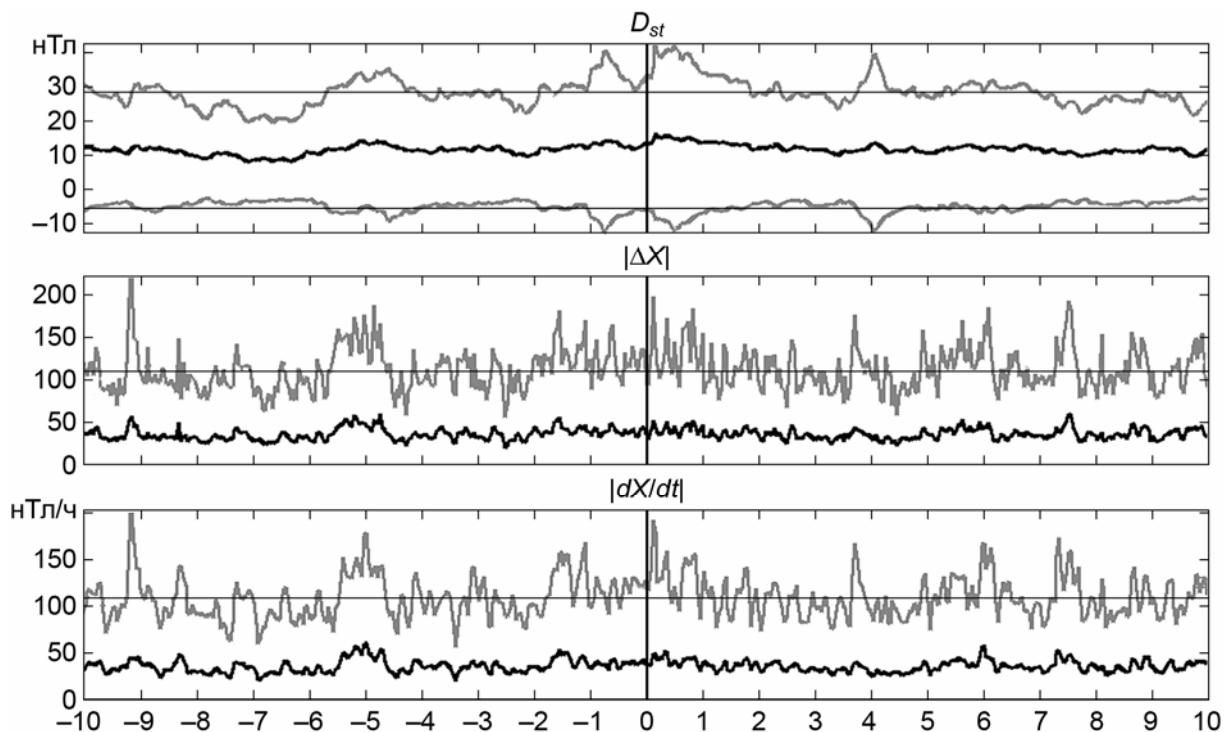


Рис. 8. То же, что на рис. 4–7, для дат, выбранных случайным образом

Fig. 8. The same as in Fig. 4–7, for randomly selected dates

Нами был проведен дополнительный анализ возможной связи сейсмичности с геомагнитной возмущенностью с несколько иной точки зрения, предполагающей рассмотрение влияния суббурь на сейсмическую активность. Действительно, самые интенсивные геомагнитные возмущения во время магнитных бурь приходятся на периоды суббурь, развивающихся на их фоне. Заметим, что и при изолированных суббурях возникающие магнитные возмущения (до нескольких тысяч нТл) могут быть соизмеримы с теми, которые наблюдаются во время бурь. По сравнению с бурями, суббури более локализованы во времени и пространстве, и их взрывное начало достаточно уверенно определяется по геомагнитным данным. Список начала суббурь компилируется на портале мировых геомагнитных данных *SuperMAG* (<http://supermag.jhuapl.edu>).

Используя этот список, мы отобрали все суббури в районе Аляски, приняв их начала за реперную точку при использовании метода наложенных эпох. Были сопоставлены региональные землетрясения в интервале ± 12 ч от начала суббури (рис. 9).

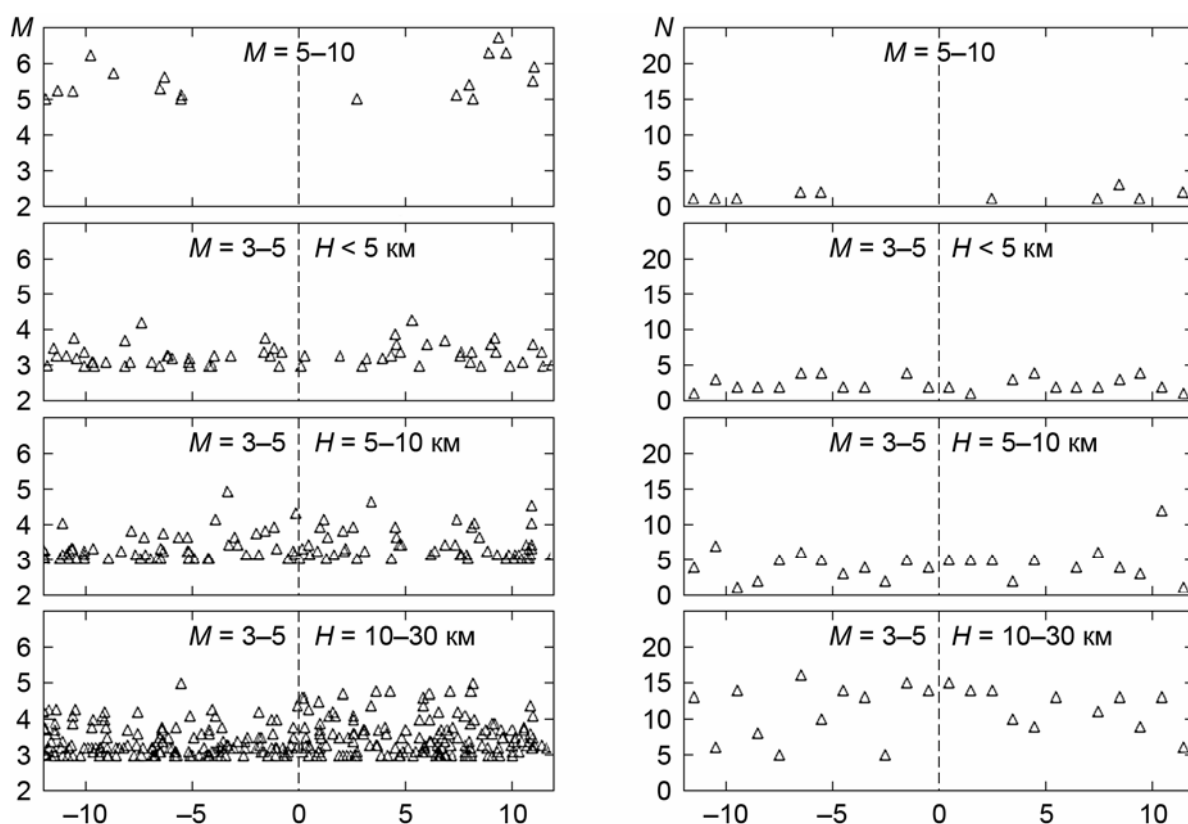


Рис. 9. Сопоставление магнитуд землетрясений (слева) и их числа (справа) для разных типов региональных сейсмических событий Аляски в интервале ± 12 ч от начала суббури, отмеченного вертикальной пунктирной линией

Fig. 9. Comparison of magnitude (left) and number (right) of earthquakes for different types of regional earthquakes in Alaska in the interval of ± 12 hours from the beginning of the substorm, marked by a vertical dashed line

Можно видеть, что после суббури число слабых неглубоких землетрясений ($5 < H < 10$ км) увеличивается примерно на 11 % (133/148), а слабых поверхностных ($H < 5$ км) – на 8 % (48/52). Однако мы не считаем, что это увеличение действительно свидетельствует об усилении сейсмичности рассматриваемой территории после суббурь. При выборе других временных интервалов соотношение числа землетрясений

до и после суббури оказывается иным, например, для интервала ± 24 ч число землетрясений первого типа остается неизменным (291/291), а второго падает на 18 % (114/93); для интервала ± 6 часов эти соотношения становятся 71/75 (увеличение на 5.6 %) и 23/22 (уменьшение на 4 %).

Обсуждение

Мы рассматриваем данную статью как адресованное космофизикам и сейсмологам приглашение к совместному обсуждению. К сожалению, имеется немало примеров, когда отсутствие междисциплинарного взаимодействия приводило к ложным открытиям (см., например, [Костерин, Пилипенко, Дмитриев, 2015]). Рассматриваемый в статье вопрос – часть фундаментальной проблемы о воздействии солнечной активности на геофизические процессы. Этой проблеме посвящено большое число исследований, основанных на анализе многолетних архивов солнечных и геофизических данных, но приведших к совершенно разным выводам. Так, утверждалось, что на длительных временных масштабах (десятки–сотни лет) глобальная сейсмичность оказывается выше то ли в периоды максимумов солнечного цикла [Han et al., 2004; Odintsov et al., 2006], то ли в периоды его минимумов [Simpson, 1967]. В то же время наличие статистических связей сейсмичности с солнечной активностью опровергалось (см., например, [Stothers, 1990; Yesugey, 2009; Love, Thomas, 2013]). Также предполагалось [Сытинский, 1985], что передаточным звеном между излучениями Солнца и сейсмическим режимом может служить атмосфера. Солнечная активность определенно может влиять на глобальную циркуляцию в атмосфере, вызывать перераспределение атмосферного давления и тем самым вызывать дополнительные тектонические напряжения [Бондур и др., 2007].

На меньших временных масштабах (месячные и годовые вариации) утверждалось, что глобальная [Simpson, 1967; Duma, Ruzhin, 2003; Rabeh, Miranda, Milan, 2010] и региональная [Бахмутов, Седова, Мозговая, 2007] сейсмичности коррелируют с уровнем геомагнитных вариаций. Авторы работы [Гульельми, Лавров, Собисевич, 2015] на более коротких временных масштабах утверждали, что SC подавляет глобальную сейсмичность в интервале времени ± 1 час.

Известны работы (см., например, [Сычева, Богомолов, Сычев, 2011; Адушкин и др., 2012]), авторы которых на микроуровне утверждают существование чувствительности высокочастотных сейсмических шумов к магнитным бурям. Но в то же время существуют работы, в которых связь фоновой сейсмичности с геомагнитными вариациями отрицается [Дещеревский, Сидорин, 2016].

На качественном уровне предполагалось, что бури с SC создают мощный импульс теллурического поля $E \sim dB/dt$ в момент SC-импульса. Резкие скачки магнитного поля B во время SC с характерным временем нарастания T около 100 с при среднем сопротивлении верхних (до 200 км) слоев на территории Аляски $\rho \sim 50$ Ом·м генерируют токи, проникающие до глубины порядка скин-длины $\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho T} \approx 35$ км. Теллурические токи, возбуждаемые при возмущении геомагнитного поля во время главной фазы с временами нарастания $T \sim 10^3$ с охватывают глубины примерно до 100 км.

Предполагаемые механизмы воздействия основаны на представлениях о возбуждении при магнитных бурях теллурических полей и токов, которые, протекая вдоль разломов, воздействуют на динамику поровой жидкости [Гохберг, Колосницын, 2010]. Попытки оценить эффект влияния теллурических токов на сейсмический процесс и “нащупать” возможный физический механизм этой связи пока только начаты [Тренькин, 2015], но получаемые в этом направлении результаты оспариваются [Черногор, 2017].

На наш взгляд, в работах, утверждающих наличие триггерного воздействия магнитных бурь на сейсмичность [Соболев, Закржевская, Харин, 2001; Закржевская, Соболев, 2002; Кузнецова и др., 2005], содержится ряд сомнительных моментов. В них, как и нами, использовался метод наложенных эпох, но за нулевой момент принималось время SC . В результате получалось, что количество землетрясений разных энергетических классов (скользящее суточное среднее в пятидневном окне) после бурь могло как увеличиваться, так и уменьшаться на второй–седьмой день.

Несмотря на мозаичность эффекта, интегральная сейсмичность также возрастала на вторые–седьмые сутки. При этом для анализа выбирались только бури с SC . На самом деле создаваемые SC временные вариации геомагнитного поля значительно меньше вариаций, возникающих на главной фазе бури. Этот факт отчетливо виден на графиках $|dX/dt|$, приводимых нами на рис. 3. Кроме того, использование SC в качестве индикатора бури ведет к тому, что в статистику могут попасть и магнитные бури, развивающиеся в совершенно других секторах местного времени и слабо проявляющиеся в локальной магнитной возмущенности.

Внезапное начало бури обусловлено воздействием на околоземную среду межпланетной ударной волны (см., например, [Пилипенко и др., 2018]). Однако значительному числу магнитных бурь SC не предшествует. По статистике за семь солнечных циклов [Newton, Milsom, 1954] бури с SC тесно следуют за солнечным циклом. В то же время, более многочисленные бури без SC не имеют четкого максимума и наиболее часты на фазе спада солнечной активности.

Эти различия обусловлены наличием двух классов бурь с разными источниками – с корональными выбросами массы при солнечных вспышках и с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Мощные возмущения геомагнитного поля создаются в ночном секторе при спорадически возникающих суббурях, которые могут развиваться и на фоне бури, и в небуревые периоды. Проведенный анализ учитывает магнитную возмущенность, создаваемую в регионе всеми бурями и суббурями. Полученный отрицательный результат ставит под сомнение гипотезу о магнитной буре как возможном триггере землетрясений, по крайней мере, для региона Аляски.

Качественное представление об экстремальных амплитудах рассматриваемых возмущений дает рис. 3. Магнитное возмущение на высоких геомагнитных широтах 65° – 70° на станциях СМО и BRW достигает $|\Delta X| \sim 800$ – 2000 нТл. Эта величина примерно на два порядка выше, чем возмущение ~ 20 нТл на низких геомагнитных широтах $\sim 40^{\circ}$ на станции FRN, соответствующих широтам Киргизии, Таджикистана, и Карпат. Вариабельность во времени геомагнитного поля $|dX/dt|$ как во время SC , так и во время главной фазы бури, также гораздо интенсивнее на высоких широтах ~ 200 – 250 нТл/мин (СМО) и ~ 600 – 1200 нТл/мин (BRW), чем на низких ~ 40 нТл/мин (FRN). Поэтому, казалось бы, воздействие магнитных бурь на сейсмический процесс на широтах Аляски должно проявляться гораздо отчетливее, чем на низких, о которых сообщалось в обсуждаемых работах (см., например, [Соболев, Закржевская, Харин, 2001; Соболев, Закржевская, 2002; и др.]). Однако проведенный нами статистический анализ не выявил таких эффектов. Авторы работы [Закржевская, Соболев, 2004] также отмечали, что для континентальной части Аляски тенденция увеличения числа землетрясений после бурь имеет низкий уровень значимости, а для островной части Аляски, как в целом по региону, значимого влияния магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность не установлено.

Подчеркнем еще раз, что в нашей работе высказывается сомнение в том, что магнитные бури могут быть триггерами землетрясений. Разумеется, это заключение нельзя распространять на выводы, полученные в экспериментах с воздействием на земную кору мощными электромагнитными импульсами. Чтобы сопоставить эффективность магнитных бурь и электромагнитного облучения, необходимо оценить создаваемые при этих воздействиях амплитуды и масштабы теллурических токов в области очага. Такие оценки, насколько нам известно, не проводились.

Заключение

Мы попытались проверить идею о геомагнитных возмущениях как триггере землетрясений для региона с высокой сейсмичностью и мощной геомагнитной активностью, каким является Аляска. Рассмотрение методом наложенных эпох относительно моментов землетрясений за 2014–2016 гг. интенсивности региональных геомагнитных вариаций $|\Delta X|$ и вариабельности магнитного поля $|dX/dt|$ не выявило явных различий в динамике геомагнитных вариаций до и после землетрясения. Все отклонения не выходили за пределы стандартного отклонения. Построенные методом наложенных эпох кривые были подобны кривым, полученным для случайных дат. Сопоставление числа сейсмических событий в интервалах разной длины относительно начал магнитосферных суббурь также показало, что сейсмичность Аляски до и после суббурь статистически значимо не меняется.

Таким образом, стандартная статистика не показывает наличия геомагнитного предвестника или триггера перед землетрясениями разных классов для региона Аляски. Тем более трудно ожидать таких эффектов на низких широтах, где возмущения, создаваемые магнитными бурями, почти на два порядка слабее, чем на авроральных широтах. Поэтому для этих широт результаты, свидетельствующие о влиянии магнитных бурь на сейсмичность, вызывают сомнение.

В то же время, это заключение нельзя распространять на выводы, полученные в экспериментах с воздействием на земную кору мощными электромагнитными импульсами. Мы также не отрицаем полностью возможности существования взаимосвязи между солнечной активностью, геомагнитным полем и сейсмичностью. Сделанный нами вывод о сомнительности магнитной бури как триггере землетрясений для региона Аляски не отрицает, в принципе, возможности триггерных эффектов в геофизических процессах¹. Не исключено, что триггерное воздействие может проявиться только при уникальном стечении благоприятных факторов, которые крайне редко встречаются и не проявляются в общей статистике. На наш взгляд, критический анализ возможных эффектов поможет конкретизировать поиски реального физического механизма такой связи.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и ГЦ РАН. Выражаем благодарность участникам 40-й конференции в Бишкеке за полезные обсуждения и всем рецензентам за конструктивную критику.

¹ Обширные сведения о таких явлениях представлены в сборниках “Триггерные эффекты в геосистемах” 2010–2019 гг., издаваемых Институтом динамики геосфер РАН.

Литература

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444, № 3. С.304–308.
- Барсуков О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. № 12. С.93–97.
- Бахмутов В.Г., Седова Ф.И., Мозговая Т.А. Геомагнитная возмущенность и землетрясения в зоне Вранча // Физика Земли. 2007. № 11. С.30–36.
- Богомолов Л.М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электро-стимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13, № 3. С.39–56.
- Бондур В.Г., Гарагаиш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // Доклады Академии наук. 2007. Т. 414, № 4. С.540–543.
- Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. Триггерные механизмы землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2010. С.52–61.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмо-электромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 170 с.
- 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.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Сравнительный морфологический анализ суточных ритмов геомагнитной активности и сейсмичности // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15, № 2. С.55–68.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С.3–15.
- 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.
- Костерин Н.А., Пилипенко В.А., Дмитриев Э.М. О глобальных УНЧ электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 1. С.24–34.
- Кузнецова В.Г., Максимчук В.Е., Городынский Ю.М., Климкович Т.А. Изучение связи аномальных эффектов в геомагнитном поле с сейсмическим режимом Карпат // Физика Земли. 2005. № 3. С.61–67.
- Пилипенко В.А., Браво М., Романова Н.В., Козырева О.В., Самсонов С.Н., Сахаров Я.А. Геомагнитный и ионосферный отклики на межпланетную ударную волну 17 марта 2015 г. // Физика Земли. 2018. № 5. С.61–80.
- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. 2012. № 7-8. С.615–639.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С.62–72.
- Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. 1998. № 7. С.85–90.
- Сытинский А.Д. Связь сейсмической активности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Наука, 1985. 206 с.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 3. С.55–71.
- Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Доклады Академии наук. 1997. Т. 353, № 4. С.542–545.

- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // Физика Земли. 2011. № 10. С.82–96.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С.152–160.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 10. С.1641–1649.
- Тренькин А.А. Возможное влияние теллурических токов на сейсмичность земной коры в сейсмоактивных областях // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 1. С.139–144.
- Черногор Л.Ф. О невозможности существенного влияния теллурических токов на сейсмичность земной коры // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 1. С.129–130.
- Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic SQ-variations // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003. V. 3. P.171–177.
- Duma G., Vilardo G. Seismicity cycles in the Mt. Vesuvius area and their relation to solar flux and the variations of the Earth's magnetic field // Physics and Chemistry of the Earth. 1998. V. 23. P.927–931.
- Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L. Possible triggering of solar activity to big earthquakes ($M_s \geq 8$) in faults with near west-east strike in China // Sci. China Ser. B: Phys. Mech. Astron. 2004. V. 47. P.173–181.
- Love J.J., Thomas J.N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P.1165–1170.
- Newton H.W., Milsom A.S. The distribution of great and small geomagnetic storms in the sunspot cycle // J. Geophys. Res. 1954. V. 59. P.203–214.
- Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V. 31, N 1-3. P.88–93.
- Rabeh T., Miranda M., Milan H. Strong earthquakes associated with high amplitude daily geomagnetic variations // Natural Hazards. 2010. V. 53. P.561–574.
- Simpson J.F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes // Earth Planet. Sci. Lett. 1967. V. 3. P.417–425.
- Stothers R.B. A search for long-term periodicities in large earthquakes of southern and coastal central California // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P.1981–1984.
- Straser V., Cataldi G., Cataldi D. Solar wind ionic and geomagnetic variations preceding the M=8.3 Chile earthquake // New Concepts in Global Tectonics Journal. 2015. V. 3. P.394–399.
- Yesugey S.C. Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula // Earth Sci. Res. J. 2009. V. 13. P.82–89.

Сведения об авторах

КОЗЫРЕВА Ольга Васильевна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; научный сотрудник, Геофизический центр РАН (ГЦ РАН). 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(903) 963-94-41. E-mail: kozyreva@ifz.ru

ПИЛИПЕНКО Вячеслав Анатольевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН (ГЦ РАН). 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(903) 618-46-66. E-mail: pilipenko_va@mail.ru

ON THE RELATIONSHIP OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES AND SEISMIC ACTIVITY FOR ALASKA REGION

O.V. Kozyreva^{1,2}, V.A. Pilipenko^{1,2}

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. Geophysicists are actively discussing the possibility of a trigger effect of solar activity and related perturbations of space weather (magnetic storms) on the earth's seismicity. We tried to test the idea of a magnetic storm and the telluric fields and currents induced by it as an earthquake trigger for a region with high seismicity and powerful magnetic activity – Alaska. The superposed epoch method (SPE) for the median values of magnetic disturbance relative to the moment of the earthquake considered the statistics of geomagnetic variations at the College station (USA) before and after shallow earthquakes in 2014–2016. The absolute values of the field perturbation $|\Delta X|$ and time derivative of the field $|dX/dt|$ have been examined. No statistically significant deviations of the SPE curves were detected 10 days before the earthquake. On the other hand, the most intense geomagnetic disturbances occur during substorms, originating both on the background of a storm and during isolated events. The number of earthquakes of different classes was compared before and after the substorm onsets in a time interval of 10 hours, but no apparent change in seismicity after substorms was revealed. The obtained results show that the hypothesis of a magnetic storm and substorm as possible earthquake triggers for the Alaska region is not supported. At the same time, the possibility of the trigger action of powerful man-made electromagnetic pulses on local seismicity cannot be excluded. This paper is considered as an invitation to a joint discussion of space physicists and seismologists.

Keywords: earthquake triggers, electromagnetic earthquake precursors, magnetic storms, geomagnetic pulsations.

References

- Adushkin V.V., Ryabova S.A., Spivak A.A., Kharlamov V.A., Seismic background response to geomagnetic variations, *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 444, no. 3, pp. 304-308.
- Bakhmutov V.G., Sedova F.I., Brain T.A., Geomagnetic disturbances and earthquakes in the Vrancea zone, *Physics of the Solid Earth*, 2007, no. 11, pp. 30-36.
- Barsukov O.M., Solar flares, sudden onset and earthquakes, *Physics of the Solid Earth*, 1991, no 12, pp. 93-97.
- Bogomolov L.M. About the mechanism of electromagnetic influence on the kinetics of microcracks and electrostimulated variations of acoustic emission of rock samples, *Physical Mesomechanics*, 2010, vol. 13, no. 3, pp. 39-56.
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L., Geomechanical models and ionospheric variations for major earthquakes under weak influence of atmospheric pressure gradients, *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 414, no. 4, pp. 540-543.
- Chernogor L.F., On the impossibility of a significant effect of telluric currents on the seismicity of the earth's crust, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 129-130.
- Descherevsky A.V., Sidorin A.Ya., Comparative morphological analysis of diurnal rhythms of geomagnetic activity and seismicity, *Geophysical Processes and Biosphere*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 55-68.
- Duma G., Ruzhin Y., Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic SQ-variations, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, pp. 171-177.
- Duma G., Vilardo G., Seismicity cycles in the Mt. Vesuvius area and their relation to solar flux and the variations of the Earth's magnetic field, *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, vol. 23, pp. 927-931.
- Gokhberg M.B., Kolosnitsyn N.I., Trigger mechanisms of earthquakes, in *Trigger effects in geosystems* (Institute of Geosphere Dynamics RAS), Moscow: GEOS, 2010, pp. 52-61.
- Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Pokhotelov O.A., *Seismo-electromagnetic phenomena*, Moscow: Nauka, 1988, 170 p.
- Guglielmi A.V., Lavrov I.P., Sobisevich A.L., Sudden onset of magnetic storms and earthquakes, *Solar-terrestrial Physics*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 98-103.

- Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L., Possible triggering of solar activity to big earthquakes ($M_s \geq 8$) in faults with near west-east strike in China, *Sci. China Ser. B: Phys. Mech. Astron.*, 2004, vol. 47, pp. 173-181.
- Kosterin N.A., Pilipenko V.A., Dmitriev E.M., On global ULF electromagnetic signals before earthquakes, *Geophysical Research*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 24-34.
- Kuznetsova V.G., Maksimchuk V.E., Gorodsky Yu.M., Klimkovich T.A., Studying the connection of anomalous effects in a geomagnetic field with the seismic regime of the Carpathians, *Physics of the Earth*, 2005, no. 3, pp. 61-67.
- Love J.J., Thomas J.N., Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, pp. 1165-1170.
- Newton H.W., Milsom A.S., The distribution of great and small geomagnetic storms in the sunspot cycle, *J. Geophys. Res.*, 1954, vol. 59, pp. 203-214.
- Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D., Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, vol. 31, no. 1-3, pp. 88-93.
- Pilipenko V.A., Bravo M., Romanova N.V., Kozyreva O.V., Samsonov S.N., Sakharov Y.A., Geomagnetic and ionospheric responses to an interplanetary shock on March 17, 2015, *Physics of the Solid Earth*, 2018, no. 5, pp. 61-80.
- Rabeh T., Miranda M., Milan H., Strong earthquakes associated with high amplitude daily geomagnetic variations, *Natural Hazards*, 2010, vol. 53, pp. 561-574.
- Simpson J.F., Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1967, vol. 3, pp. 417-425.
- Smirnov V.B., Zavyalov A.D., On the issue of seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere, *Physics of the Solid Earth*, 2012, no. 7-8, pp. 615-639.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Earthquake physics and precursors, Moscow: Nauka, 2003, 270 p.
- Sobolev G.A., Shestopalov I.P., Kharin E.P., Geoeffective solar flares and seismic activity of the Earth, *Physics of the Solid Earth*, 1998, no. 7, pp. 85-90.
- Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Kharin E.P., On the connection of seismicity with magnetic storms, *Physics of the Solid Earth*, 2001, no. 11, pp. 62-72.
- Stothers R.B., A search for long-term periodicities in large earthquakes of southern and coastal central California, *Geophys. Res. Lett.*, 1990, vol. 17, pp. 1981-1984.
- Straser V., Cataldi G., Cataldi D., Solar wind ionic and geomagnetic variations preceding the M=8.3 Chile earthquake, *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 2015, vol. 3, pp. 394-399.
- Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Sychev V.N., On geoeffective solar flares and variations in the level of seismic noise, *Physics of the Earth*, 2011, no. 3, pp. 55-71.
- Sytinsky A.D., *The relationship of Earth's seismic activity with solar activity and atmospheric processes*. L.: Nauka, 1985, 206 p.
- Tarasov N.T., Changes in the seismicity of the crust during electrical exposure, *Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections*, 1997, vol. 353, no. 4, pp. 542-545.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Changing the seismicity of the Bishkek geodynamic test site under electromagnetic influence, *Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 10, pp. 1641-1649.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeygarnik V.A., Impact of powerful electromagnetic pulses on the seismicity of Central Asia and Kazakhstan, *Volcanology and Seismology*, 1999, no. 4-5, pp. 152-160.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., The influence of electromagnetic fields on the rate of seismotectonic deformations, relaxation of elastic stresses, their active monitoring, *Physics of the Solid Earth*, 2011, no. 10, pp. 82-96.
- Trenkin A.A., Possible influence of telluric currents on the seismicity of the earth's crust in seismically active areas, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 139-144.
- Yesugey S.C., Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula, *Earth Sci. Res. J.*, 2009, vol. 13, pp. 82-89.
- Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A., On the possible influence of magnetic storms on seismicity, *Physics of the Solid Earth*, 2002, no. 4, pp. 3-15.
- Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A., The effect of magnetic storms with a sudden onset on seismicity in various regions, *Volcanology and Seismology*, 2004, no. 3, pp. 63-75.