

УДК 550.385.36+550.348.436

**В. Г. Бахмутов, Ф. И. Седова, Т. А. Мозговая**

Институт геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

**Среднеширотное проявление полярной суббури и реализация сейсмической энергии в зоне Вранча**

*Доповідь на конференції 05.09.05*

На прикладі зони зосередженої сейсмічності Вранча показано, що основною морфологічною ознакою у спектрі геомагнітних варіацій перед землетрусами є середньонічна полярна суббура, коли вона вирізняється найбільшою інтенсивністю та тривалістю. Суббурі проявляються як на відносно спокійному фоні, так і під час бур. Головним являється різке і значне збільшення Н-складової в середніх і низьких широтах. Оскільки прояв суббур чітко пов'язаний з часом доби, то вони можуть збігатися з різними фазами геомагнітної бурі, що природно впливає на величину перепаду (градієнта). Саме перепади в геомагнітному полі є спусковим механізмом для реалізації сейсмічної енергії. Введено поняття «типу» градієнта, з яким можуть бути пов'язані землетруси. Перш за все це ізольована середньонічна полярна суббура на спокійному фоні. Інші типи пов'язані з варіантами послідовності середньонічної суббури відносно Dst-варіації, а також бур з раптовим початком. На прикладі землетрусів у зоні Вранча показано, як від типу градієнта в геомагнітному полі змінюються сейсмічні характеристики.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из факторов, влияющих на процесс подготовки землетрясения является солнечная и связанная с ней геомагнитная активность. Однако до настоящего времени нет четкого представления, как именно геомагнитное поле воздействует на реализацию сейсмической энергии. Например, есть мнение, что геомагнитное поле является только «спусковым механизмом» для реализации землетрясения, не имея отношения к его подготовке [9]. Работы, в которых сделаны попытки показать, каким образом геомагнитное поле может способствовать реализации внутренней энергии, немногочисленны. Так, в работе [13] показано, что одним из механизмов воздействия магнитных бурь на сейсмичность могут быть электроосмотические явления в массиве

горных пород. Сделан вывод, что так как этот эффект минимален, корреляция между вариацией магнитного поля и тектоническими процессами будет слабой. С этим вполне можно согласиться, но только для случая, рассмотренного авторами в указанной работе. Если же исходит из представления о возможности накопления энергии в очаге, то и эффект, по-видимому, будет совершенно другим. Мы придерживаемся взглядов, высказанных в работе [12], что большинство землетрясений — следствие быстрой разрядки напряжения, которое сравнительно медленно, но постоянно накапливается в определенных участках земной коры и верхней мантии. Перед землетрясением происходит перераспределение напряжений в ограниченном объеме вещества, что и приводит к реализации сейсмической энергии.

Изначально мы ставили перед собой задачу поиска морфологических признаков в структуре геомагнитных вариаций в связи с подготовкой и реализацией землетрясений [2, 8]. Был сделан вывод о том, что реализации сейсмической энергии предшествует резкий перепад (градиент) в горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Вывод сделан по результатам анализа вариаций ежечасных экстремальных значений  $H$ -составляющей, однако оказалось, что при таком подходе оценка связи геомагнитного поля с сейсмичностью неэффективна. В дальнейшем на примере зоны Вранча было показано, что в разрядке сейсмической энергии играют роль конкретные типы колебаний. В частности, землетрясения в этой зоне связаны со среднеширотным проявлением околополуночной полярной суббури. Энергетический класс толчков коррелирует с амплитудой в максимуме развития суббури, т. е. с перепадом в  $H$ -составляющей, предшествующим толчку. За весь исследуемый 10-летний период в 85—90 % случаев именно околополуночная полярная суббуря предшествовала реализации сейсмической энергии. Была получена единая линейная зависимость между длительностью временного интервала от перепада до толчка и глубиной очага как для подкоровых, так и для коровых толчков. Цель настоящей работы — анализ выявленных закономерностей по связи полярных суббурь и их проявления в средних широтах с сейсмичностью в зоне Вранча.

Сведения о землетрясениях были взяты из сейсмологических бюллетней Украины. Толчки рассматривались независимо от их энергетического класса. За характеристику сейсмичности приняты энергетический класс  $K$  толчка и глубина  $h$  очага.

Анализ геомагнитной обстановки проводился по магнитограммам геофизических станций в Корце ( $\varphi = 50.6^\circ \text{ N}$ ;  $\lambda = 27.2^\circ \text{ E}$ ) для 1977 г. и Ястребовке ( $\varphi = 45.5^\circ \text{ N}$ ;  $\lambda = 34.1^\circ \text{ E}$ ) для 1988—1996 гг.

Количественная оценка осуществлялась по анализу поведения  $H$ -составляющей. В настоящей работе перепад (градиент) определялся, в отличие от [8], по максимуму в развитии околополуночной полярной суббури, отсчет берется от нулевого уровня, условно принятого за нормальное поле.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На примере сильных землетрясений в зоне Вранча нами показано, что в реализации сейсмической энергии основное значение играют большие перепады геомагнитного поля в  $H$ -составляющей, наиболее четко отражающей воздействие внешних факторов [2, 8]. Между градиентом и толчком всегда есть некоторый временной интервал  $\tau$ . Необходимо отметить, что кроме перепада в непосредственной близости к толчку, иногда следует учитывать и предшествующий сильный перепад в геомагнитном поле (по нашему определению главный градиент), который может существенно повлиять на временной интервал. Главный градиент связан с сильными бурями, например при разрушительных землетрясениях в зоне Вранча в 1977 и 1990 гг., описанных нами в работе [8]. Магнитные бури сопровождаются развитием в магнитосфере интенсивного кольцевого тока. В эти дни преимущественное суточное значение  $\Sigma K_p = 30 \dots 60$ . Если же мы учитываем перепад в непосредственной близости к толчку, который связан с околополуночной полярной суббурей, то преобладающая  $\Sigma K_p = 20 \dots 30$ . Сами же толчки (около 80 % случаев) происходят преимущественно на спокойном или слабовозмущенном геомагнитном фоне.

Результаты анализа геомагнитной обстановки в связи с землетрясениями в зоне Вранча показали, что при всей разнохарактерности геомагнитных возмущений именно с околополуночной полярной суббурей связана последующая реализация сейсмической энергии в этой зоне: для глубокофокусных землетрясений в 86 %, а для коровых — 80 % случаев.

Суточное распределение суббурь и связанных с ними перепадов в  $H$ -составляющей геомагнитного поля перед коровыми и глубокофокусными землетрясениями показано на рис. 1, из которого видно, что их максимум приходится на 20—24 UT (18—22 LT).

Характер геомагнитного поля нами проанализирован для 150 глубокофокусных землетрясений и более 50 толчков в земной коре. В обоих случаях градиентом перед толчками в основном были разные по продолжительности  $T$  суббури. Из рис. 2, а видно, что глубокофокусным землетрясениям предшествуют суббури с  $T \geq 60$  мин,

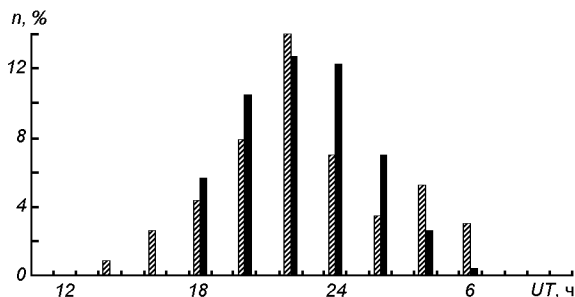


Рис. 1. Суточное распределение суббурь перед коровыми и глубокофокусными землетрясениями в зоне Вранча за период 1988—1996 гг.

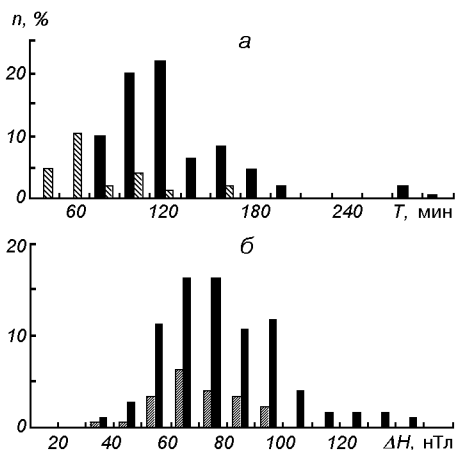


Рис. 2. Преимущественные продолжительности (а) и амплитуды (б) околополуночных полярных суббурь перед коровыми (штрихи) и глубокофокусными землетрясениями в зоне Вранча

а коровым толчкам с  $T \leq 60$  мин. Как перед глубокофокусными, так и перед коровыми землетрясениями суббури мало отличаются по амплитуде, но диапазон амплитуд существенно шире перед глубокофокусными толчками (рис. 2, б).

Временной интервал от максимума в развитии суббури до последующего толчка ( $\tau$ , ч) связан с глубиной очага ( $h$ , км), что демонстрируется нами на рис. 3. Однако общая возмущенность геомагнитного поля, связанная с солнечной активностью, может сказаться на величине  $\tau$ . Резкие перепады в геомагнитном поле во время мировых магнитных бурь могут существенно

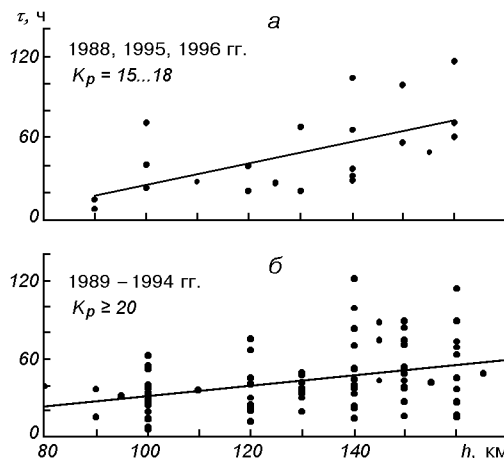


Рис. 3. Корреляция временного интервала  $\tau$  с глубиной  $h$  очага последующего за перепадом в магнитном поле землетрясения в зоне Вранча для периодов низкой (а) и высокой (б) геомагнитной активности

сократить временной интервал  $\tau$  (иногда до 4—7 ч), что сказывается на линейных соотношениях между этими величинами (рис. 3, б). Следует также иметь в виду, что разброс точек на графиках связан с целым рядом факторов, которые вносят погрешности при «привязке» перепада в геомагнитном поле к толчку. Например, это погрешность в определении глубины землетрясений, неточность в определении максимума суббури, и другие. Из рис. 3 очевидно, что большой разброс  $\tau$  связан с повышением уровня среднегодовой геомагнитной активности ( $\sum K_p \geq 20$ ). Тем не менее, близкая к линейной закономерность прослеживается.

**ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ СУББУРЬ В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**

Суббури проявляются как на относительно спокойном фоне, так и во время бури. Так как проявления суббурь четко связаны со временем суток, то они могут совпадать с различными фазами геомагнитной бури, что естественно сказывается на величине перепада (градиента).

Суббурия — это комплекс магнитных и ионосферных явлений, где главным является значительное увеличение аврорального электроджета. Характер поведения суббурь в высоких широтах

свидетельствует об индивидуальных особенностях каждого возмущения вследствие большой динамичности электроструй, ответственных за эти возмущения. Относительные величины амплитуд суббурь стабильны только в средних и низких широтах [6, 7]. С другой стороны поле геомагнитной бури представляет собой сумму аperiодической вариации ( $D_{st}$ ), возмущенной суточной вариации и нерегулярных вариаций. Именно нерегулярные вариации обуславливают разнохарактерную индивидуальность бурь. Они представляют собой сравнительно медленные изменения магнитного поля продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов, на которые накладываются более быстрые колебания. Спектр частот нерегулярных вариаций не зависит от интенсивности геомагнитной бури [1]. Буря обычно определяется сильным уменьшением  $H$ -составляющей в средних и низких широтах, связанным с развитием кольцевого тока. Однако, как отмечено в работе [3], взаимосвязь между физическими процессами, ответственными за геомагнитные бури и суббури, пока не имеют однозначного объяснения. Процессам взаимодействия кольцевого тока и авроральных возмущений посвящен ряд работ [1, 3—5, 10, 11]. Анализ геомагнитных вариаций за десятилетний период в связи с землетрясениями во Вранче позволил убедиться, что развитие кольцевого тока препятствует затеканию высокоширотных авроральных токов, т. е. ограничивает возможность среднеширотного проявления поля суббурь, что естественно сказывается на их интенсивности. Обсуждение механизма этого явления выходит за рамки настоящей работы. Однако в связи с отмеченным выше фактом и нашим представлением, что именно со среднеширотным проявлением полярной суббури связана реализация сейсмической энергии, ниже приведены результаты анализа полярных суббурь по морфологическим признакам их проявления в средних широтах и связи с магнитными бурями. Это позволило систематизировать перепады в магнитном поле по разным типам.

*Первый тип (I).* Это относительно изолированная околополуночная полярная суббуря на сравнительно на спокойном фоне.

*Второй тип (II)* представляют случаи, когда суббуря предшествует главной фазе бури, т. е. перед максимумом в развитии  $D_{st}$ -вариации.

К *третьему типу (III)* отнесены случаи, когда суббуря проявляется на стадии затухания  $D_{st}$ -вариации.

Второй и третий тип перепадов нами условно названы «прямым» и «обратным» соответственно.

*Четвертый тип (IV)* — буря или возмущение с внезапным началом, на фоне которой проявляется полярная суббуря.

Остальные типы геомагнитных возмущений относительно редки и в основном не связаны с суббуриями.

*Пятый тип (V)* — рекуррентная буря или возмущение, внутри которой может быть возмущение с внезапным началом или просто внезапные импульсы, но нет суббурь.

*Шестой тип (VI)* — внезапные импульсы (Si) изолированные или повторяющиеся. Суббурь нет.

*Седьмой тип (VII)* — аномальное поведение суточного хода  $H$ -составляющей;  $S_q$ -вариация не выражена. Уровень поля в течение суток очень высокий или очень низкий. Суббурь нет.

*Восьмой тип (VIII).* К этому типу отнесены случаи отрицательной полярной суббури в  $H$ -составляющей геомагнитного поля.

Примеры первых четырех типов перепадов в геомагнитном поле показаны на рис. 4. Одним из классических примеров первого типа может быть суббуря, предшествующая сильнейшему землетрясению в зоне Вранча 4 марта 1977 г.

Примером «прямого» и «обратного» типа по нашему мнению может быть геомагнитная обстановка, предшествующая одному из сильнейших по разрушительным последствиям землетрясений в окрестностях города Спитак в 1988 г. Землетрясение произошло 07.12.1988 г. ( $M = 7.0$ ,  $h = 10$  км,  $\varphi = 40.9^\circ$  N,  $\lambda = 44.2^\circ$  E). Очаг землетрясения расположен на разломе в зоне стыка Арабской и Евразийской литосферных плит. Вот что написано в связи с этим землетрясением в работе [5]: «геомагнитное поле в первой половине декабря оставалось спокойным, за исключением малой бури с постепенным началом, продолжавшейся со второго по четвертое декабря. На фоне высокой солнечной активности интенсивных вспышек не зарегистрировано». По наблюдениям на станции Ястребовка 02—04.12.1988 г. небольшая буря завершилась суббурей в 17.30—18.30 UT ( $H_{\max} = 62$  нТл,  $D = 46$  нТл,  $Z = 7$  нТл). Последующие дни и в день

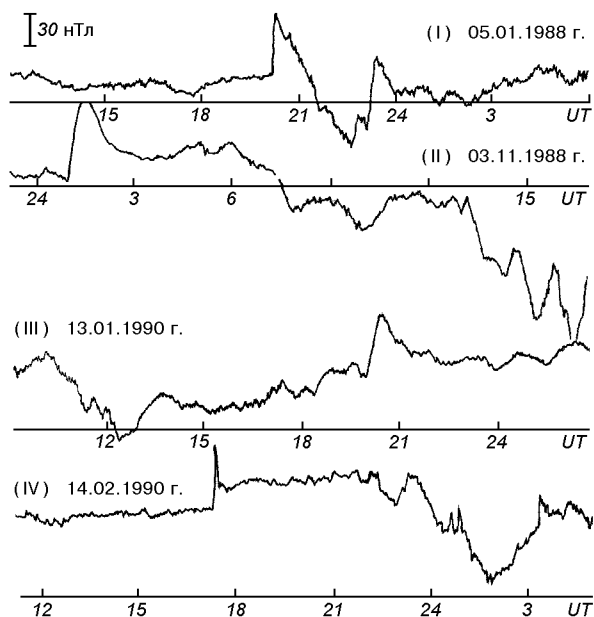


Рис. 4. Основные типы перепадов в  $H$ -составляющей геомагнитного поля по магнитограммам станции Ястребовка

землетрясения поле было совершенно спокойным ( $\Sigma K_p = 5-7$ ). Ближайший предшествующий землетрясению максимум геомагнитной активности отмечен 30.11.1988 г. ( $K_p = 32$ ), что, согласно нашим представлениям, является главным градиентом. По наблюдениям в Ястребовке (рис. 5) 30.11.1988 г. в 8.00—11.30 UT наблюдается первый перепад («прямой» тип), в 16.30—19.30 UT — второй перепад («обратный» тип). Завершается буря сравнительно небольшой ( $T < 60$  мин) суббурей. По-видимому, два больших перепада за непродолжительное время с 8.00 до 19.30 UT и были причиной катастрофического землетрясения 07.12.1988 г. (интервал от градиента до толчка  $\tau \sim 7$  сут).

На описанную выше и показанную на рис. 5 ситуацию в геомагнитном поле зона Вранча и Украинские Карпаты отреагировали следующим образом: 04.12.1988 г. был зарегистрирован коровый толчок  $K = 9.9$  в Украинских Карпатах ( $\tau \approx 5$  сут); 11.12.1988 г. — глубокофокусный толчок ( $h = 130$  км,  $K = 9.9$ ) в зоне Вранча ( $\tau \approx 11$  сут).

За десятилетний период нами рассмотрено порядка 150 глубокофокусных землетрясений в

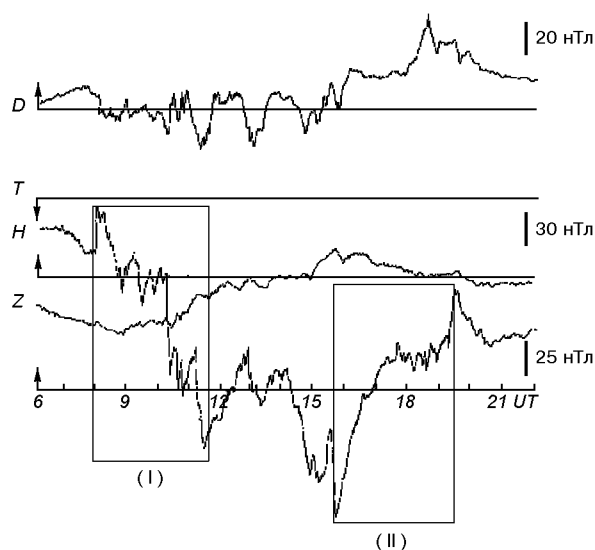


Рис. 5. Фотокопия магнитограммы 30.11.1988 г. станции Ястребовка перед разрушительным землетрясением вблизи г. Спитак, как иллюстрация прямого (I) и обратного (II) типа перепадов в геомагнитном поле

зоне Вранча. Для каждого из них определен перепад в геомагнитном поле, предшествующий толчку, в соответствии с выше описанной классификацией. Первые четыре типа являются основными в реализации сейсмической энергии в зоне Вранча (таблица). С ними связаны 92 % толчков. Остальные 8 % составляют случаи, когда глубокофокусному толчку предшествует либо аномальное поведение суточного хода  $H$ -составляющей, включая его очень высокий уровень с отсутствием суббурей, либо случаи с отрицательной суббурей. В периоды, когда суббури на магнитограммах отсутствуют (тип V, IV), во Вранче вообще не было глубокофокусных землетрясений.

#### Выводы

Детальный анализ геомагнитных вариаций в связи с землетрясениями в зоне Вранча позволил составить некоторое представление о роли магнитных возмущений в реализации сейсмической энергии и показать, что землетрясения связаны с определенными типами вариаций.

Количество  $n$  перепадов в Н-составляющей геомагнитного поля, предшествующих землетрясениям в зоне Вранча

Тип перепада	Количество землетрясений $n$										$\Sigma n$	$\Sigma n, \%$
	1977 г.	1988 г.	1989 г.	1990 г.	1991 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.		
I	10	5	1	5	14	9	5	7	2	5	63	42
II	2	—	2	10	10	5	4	3	1	2	39	26
III	—	—	4	4	1	1	2	1	6	1	20	13
IV	1	2	2	2	3	3	2	2	1	1	19	12
V	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VI	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VII	1	2	2	1	1	—	—	1	—	—	8	5
VIII	1	—	1	1	—	—	—	—	—	—	3	2
Среднегодовые $\Sigma K_p$												
	17.1	18.3	22.1	20.4	24.0	20.7	19.5	21.9	17.3	15.5		

Реализация сейсмической энергии, независимо от энергетического класса или магнитуды толчка происходит по вполне определенной схеме и связана с определенным типом геомагнитных возмущений. В частности, для зоны Вранча это среднеширотное проявление околополуденной полярной суббури. Об этом свидетельствуют следующие выявленные закономерности:

- перепад (градиент) в геомагнитном поле, связанный с протеканием полярной суббури, предшествует разрядке сейсмической энергии — сейсмическое событие происходит через определенное время после суббури;
- временной интервал от максимума в развитии суббури до толчка связан с глубиной очага землетрясения;
- установлена зависимость энергетического класса толчков от интенсивности проявления полярной суббури;
- выявлены определенные морфологические признаки в спектре геомагнитных вариаций, предшествующие реализации сейсмической энергии. Признаки систематизированы по разным типам, при этом четырем из них, связанным с околополуденными суббуриями, соответствует более 90 % сейсмических событий.

1. Афанасьева В. И., Литинский В. М., Седова Ф. И. Нерегулярная часть поля геомагнитных бурь в средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия.—1972.—№ 5.—С. 953—955.
2. Бахмутов В. Г., Седова Ф. И., Мозговая Т. А. Связь временного интервала между градиентом в геомагнитном поле и глубиной очага последующего землетрясе-

3. Гельберг М. Г., Кертенгольд С. З., Шадрин Л. П., Шараева С. В. Взаимосвязь между классами геомагнитных бурь и авроральными геомагнитными возмущениями // Геомагнетизм и аэрономия.—2000.—40, № 1.—С. 26—32.
4. Головкин В. П., Зверева Т. И. Пространственно-временная структура среднеширотных геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия.—2000.—40, № 1.—С. 84—92.
5. Денуев В. Х. К ионосферным эффектам Спитакского землетрясения по наблюдениям Доплеровского смещения частоты в дальней зоне // Геомагнетизм и аэрономия.—1999.—39, № 6.—С. 127—130.
6. Литинский В. М. Об источниках геомагнитных суббурь в средних широтах // Геофиз. журн.—1991.—13, № 6.—С. 79—85.
7. Литинский В. М., Седова Ф. И. О положительных бухтообразных возмущениях в авроральной зоне // Геофиз. сб. АН УССР.—1977.—77.—С. 82—84.
8. Седова Ф. И., Бахмутов В. Г., Мозговая Т. А. О морфологических признаках в структуре геомагнитных вариаций накануне и в момент землетрясения в Крымско-Черноморском и Карпатском регионах // Геофиз. журн.—2001.—23, № 4.—С. 61—68.
9. Соболев Г. А., Закржевская Н. А., Харин Е. П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли.—2001.—№ 11.—С. 62—72.
10. Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Асимметрия кольцевого тока и активность авроральных электроструй во время магнитной бури // Геофиз. журн.—1994.—14, № 5.—С. 82—86.
11. Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И., Белов Б. А. Динамика магнитосферной активности в период интенсивной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия.—1989.—29, № 1.—С. 110—115.
12. Харечко Г. Е., Исиченко Е. П., Лазаренко М. А. Проблема прогнозирования землетрясений на Украине и пути ее разрешения // Геофиз. журн.—1980.—2, № 6.—С. 106—112.
13. Kormiltsev V. V., Kostrov N. P., Ratushnyak A. N., Shapiro V. A. The influence of electro-osmotic pressure generating by geomagnetic disturbances on the evolution of

siesmotectonic process // Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Eds M. Nayakawa, O. A. Molchanov. — Terrapub, Tokyo, 2002.—P. 203—207.

---

**MIDLATITUDINAL MANIFESTATION OF POLAR SUBSTORM AND SEISMIC ENERGY REALIZATION IN VRANCEA**

V. G. Bakhmutov, F. I. Sedova, T. A. Mozgova

Using the concentrated seismicity zone of Vrancea as an example, it is shown that the main morphological sign in the geomagnetic variations spectrum before earthquakes is the near-midnight polar substorm when it is marked by the highest

intensity and longest duration. The substorms manifest themselves both at a relative quietness and during storms. The main feature is an abrupt and notable increase of the H-component at mean and low latitudes. As the substorm manifestation is clearly related to the day and night time they may coincide with different phases of geomagnetic storm, which naturally affects the difference (gradient). It is the geomagnetic field difference that provides a trigger mechanism for seismic energy realization. We introduce the conception of the gradient «type» to which the earthquakes may be related. First of all, it is an isolated near-midnight polar substorm against a quiet background. The other types are associated with the version of the order of the midnight substorm with respect to the  $D_{st}$ -variation as well as the sudden commencement storm. On the example of the Vrancea earthquakes it is shown how the gradient type in the geomagnetic field changes the seismic characteristics.