

УДК 550.385.37:550.388

ОТКЛИК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЛУБОКОФОКУСНОЕ ОХОТОМОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2013 ГОДА С $M = 8.3$

Бурым Ю. А., Самсонов К. А.

*ГАНУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Республика Крым, Россия.
E-mail: seismoexpert@gmail.com*

По архивам сети «Интермагнет» проанализирован отклик геомагнитного поля на глубокофокусное землетрясение 24.05.2013, зарегистрированный на станциях с ежесекундной регистрацией 3-х компонент поля по всему Миру. Установлено, что момент возникновения отклика в диапазоне периодов 1–10 с совпадает с временем прихода сейсмических волн в район каждой станции, причем отклик зафиксирован лишь на половине станций, независимо от их местоположения. Сделано предположение о том, что причиной рассмотренного сейсмомагнитного эффекта является существование остаточной намагниченности горных пород в районах станций, что частично подтверждается при анализе расположения станций на картах аномального магнитного поля.

Ключевые слова: вариации геомагнитного поля, предвестники землетрясений, магнитные минералы.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение геомагнитных вариаций имеет не только фундаментальное значение для изучения глобальных космических процессов, но также связано с надеждой сейсмологов и геофизиков получить дополнительную возможность прогноза землетрясений. Для решения этой задачи в последние десятилетия получены важные теоретические результаты, позволяющие установить на уровне физики твердого тела возможные механизмы преобразования энергии механической в электромагнитную. Согласно общепринятым представлениям электромагнитные колебания в горных породах возбуждаются переменными электрическими токами, которые возникают при упругом напряжении в горных породах, смещении, движении частиц (различные физические механизмы для скорости и ускорения) вследствие взаимодействия с сейсмической волной [1, 2]. Носителем возникающих токов предполагается флюид, наполняющий трещины и поры горных пород, довольно абстрактное понятие. При анализе времени возникновения электромагнитного сигнала было установлено, что источником электромагнитных колебаний могут являться неоднородности геологических структур на пути распространения сейсмических волн. Возможно также влияние напряженного состояния или деформации горных пород на доменные структуры зерен магнитных минералов [3]. Таким образом, существуют две равнозначные точки зрения, где в качестве источника сейсмомагнитного сигнала служит или очаг землетрясения, или среда на пути сейсмических волн. В работе [4] исследовался сейсмомагнитный сигнал, вызванный сейсмической волной Лява, причем время возникновения сигнала однозначно связывалось с приходом в район геомагнитной станции сейсмической волны. В другой работе [5] исследовался геомагнитный отклик на землетрясения в разных районах, регистрировавшийся главным образом станциями сети «Интермагнет», имеющими дискретность измерений 1 мин. Запаздывание короткопериодных вариаций по отношению к моменту землетрясения авторы

связывают с неустановленными быстропротекающими в очаге процессами после основного толчка с последующей «передачей сигнала» через ионосферу. Т. е. источником вариаций предполагается очаг землетрясения. Также большое внимание было уделено длиннопериодным (с характерными периодами в несколько минут) вариациям, которые в итоге трудно однозначно интерпретировать вследствие существования множества возможных механизмов их происхождения. По нашему мнению нельзя достоверно утверждать о секундных задержках сейсмомагнитного сигнала, анализируя минутные данные. В работе [6] на основании математической обработки (построении спектрограмм) минутных записей делается вывод о существовании предвестников землетрясения, наблюдаемых в первые десятки секунд или минуты до сейсмического события. С нашей точки зрения этот результат может оказаться не точным, поскольку в математике существует принцип неопределенности: чем лучше спектр, тем хуже точность определения времени. За момент возникновения сигнала принимается середина спектрограммы, что также может привести к дополнительной погрешности. Кроме того, проблему изучения предвестников нужно воспринимать в двух аспектах. Во-первых, важно установить сам факт их существования с точки зрения причинно-следственных связей и физических механизмов, а во-вторых, все-таки нужно стремиться к результатам, имеющим практическое значение. В этом смысле появление предвестников за много тысяч километров ничего не дает, поскольку нет даже принципиальной возможности определить место будущего землетрясения.

В связи с вышеизложенным в данной работе была поставлена задача исследовать магнитные записи, полученные при ежесекундной регистрации 3-х компонент геомагнитного поля для тех случаев, когда не вызывает сомнений происхождение электромагнитного сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предварительно была проведена работа по изучению электромагнитных откликов и поиску предвестников сильных землетрясений в сейсмических районах, в которых имеется «секундная» геомагнитная станция сети «Интермагнет» на расстоянии до 100 км от эпицентра. Целью работы было исследование проявления сейсмомагнитного эффекта в каждом конкретном районе в зависимости от магнитуды, глубины землетрясения и месторасположения эпицентров. В частности, нами было установлено, что геомагнитный отклик на Новозеландское землетрясение 13.11.2016 $M = 8$, проиллюстрированный на рис. 1, имеет локальный характер, поскольку на записях других станций мира (даже близких — Канберра, Маккуори, Гуам) эффект отсутствует.

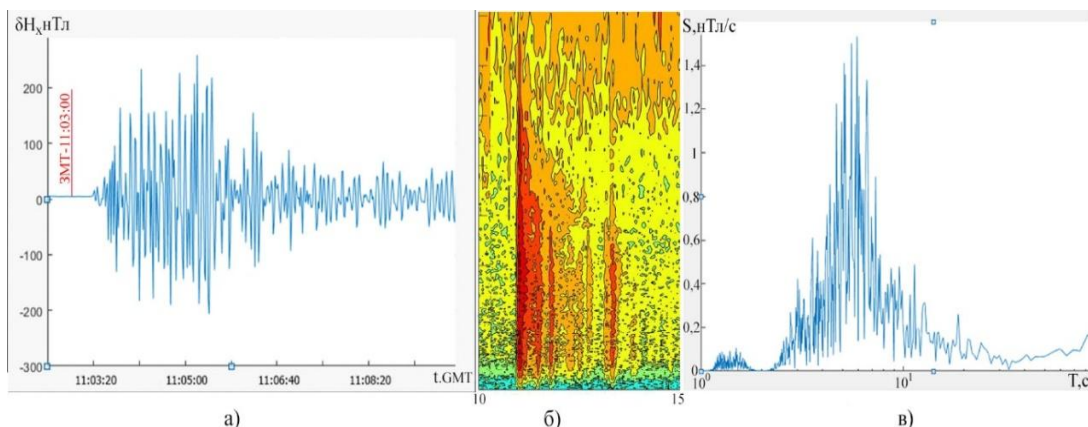


Рис. 1. Вариации X-компоненты геомагнитного поля, зарегистрированные на ст. EYR в момент землетрясения 13.06.2016 с $M_S = 8$ в Новой Зеландии: а) запись вариации, б) спектрограмма, в) спектр сигнала.

Расстояние от ст. EYR до эпицентра около 100 км. Уточненное по каталогу ISC время в очаге землетрясения указано красной чертой. Время до возникновения отклика было определено при увеличенном рассмотрении записи и составило 12 с после основного толчка. Спектр расположен в диапазоне периодов 1–10 с. На рис. 1 б приведена спектрограмма сигнала с 10 до 15 час по Гринвичу, вычисленная при окне 512 сек с шагом 200 сек. На спектрограмме отчетливо прослеживаются все последующие в этот период афтершоки. Приведенная на рис. 1 запись X-компоненты геомагнитного поля явилась для нас эталоном для дальнейшего поиска, в спорных случаях существует возможность находить отклик по спектрограмме сигнала.

Для проверки утверждения о локальности эффекта как нельзя лучше подходит Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. с магнитудой 8.3 и глубиной очага более 600 км [7]. Сейсмические колебания от этого землетрясения не только были зарегистрированы всеми сейсмостанциями Мировой сети, но и ощущались населением до расстояний 10 000 км. Логично было ожидать, что и геомагнитные возмущения имеют глобальный характер. Масштабность события позволяет увидеть картину отклика всего Земного шара в целом и сравнить возникший сигнал в разных его частях. В настоящей работе по данным сети «Интермагнет» проанализированы записи геомагнитных станций, имеющих 3-х компонентные ежесекундные измерения, работавших в момент землетрясения по всему Миру.

ОТКЛИК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЛУБОКОФОКУСНОЕ ОХОТОМОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2013 ГОДА С $M = 8.3$

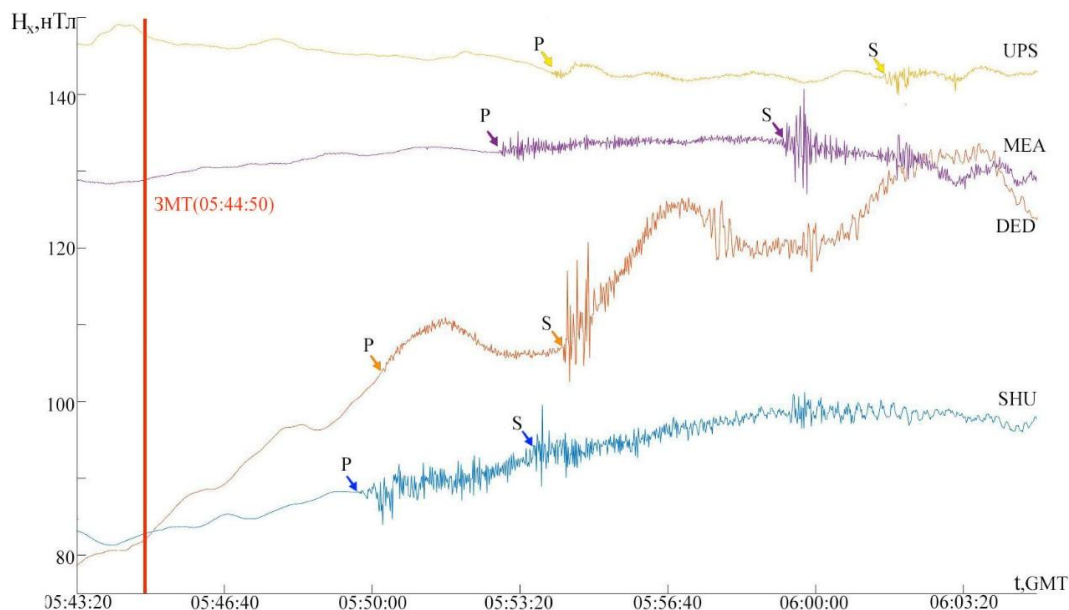


Рис. 2. X-компонента геомагнитного поля, зарегистрированная на различных геомагнитных станциях. Красная черта — момент землетрясения (время в очаге). Стрелками указаны моменты прихода объемных P- и S-волн на ближайшие сейсмостанции (табл. 1).

На рис. 2 приведены записи X-компоненты геомагнитного поля для четырех станций, находящихся на разных эпицентральных расстояниях от Аляски до Швеции, которые являются наиболее характерными для иллюстрации общей картины отклика. При тщательном увеличенном рассмотрении записей был определен момент возникновения геомагнитного отклика на землетрясение для каждой из станций. Затем, по данным каталога ISC, были определены ближайшие к геомагнитным пунктам сейсмические станции и времена прихода сейсмических волн на эти станции. Результаты сравнения времен возникновения магнитного и сейсмического сигнала приведены в таблице 1. Времена практически совпадают, отличие не превышает нескольких секунд, что мало по сравнению с временами пробега сейсмических волн, составляющих от 5 до 20 мин. Вследствие этого можно утверждать, что геомагнитные станции зарегистрировали возникновение характерных колебаний X-компоненты геомагнитного поля через некоторое время Δt после толчка (далее время задержки), соответствующее времени прихода сейсмической волны в район станции. Каждая из дошедших волн приводит к возникновению своего цуга колебаний. Отклик на S-волны, как правило, больше.

Таблица 1.

Время возникновения и амплитуда отклика на Охотоморское землетрясение 24.05.2013 05:44:50 $M = 8.3$, зарегистрированного геомагнитными станциями «Интермагнет» в сравнении с временами прихода сейсмических волн на ближайшие к указанным геомагнитным сейсмические станции

Код и месторасположение геомагнитной станции	Расстояние, Δ°	Время отклика на землетрясение		Код ближайшей с/ст	Время прихода сейсмической волны		Ампл. отклика, нТл	
		<i>P</i>	<i>S</i>		<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
API Самоа	74.84	5:55:34	6:04:24	CTA	5:55:30	6:04:20	0.25	0.4
ASP Австралия	80.58	5:56:11	6:05:19	ASAR	5:55:56	6:05:12	1.5	1.75
BLC Канада	49.59	5:52:49	5:59:11				0.75	3.5
BOU США	63.99	5:54:28	6:02:24	ISCO	5:54:28	6:02:14	1.125	1.125
BSL США	79.31	5:56:02	6:05:12	Z52A	5:55:53	6:05:11	2	3.5
CBV Канада	43.77	5:52:08	5:57:55	YKA	5:52:08	5:58:00	0.35	2.75
CMO США	29.92	5:50:12	5:54:31	MDM	5:50:10	5:55:43 (ScP)	3.5	4
DED США	29.21	5:50:14	5:54:18				0.75	15
EYR Новая Зеландия	99.79		6:07:12			6:07:04		
FCC Канада	54.30	5:53:23	6:00:20	FFS	5:53:22		0.3	1
FRD США	77.44	5:55:47	6:04:54	S57A	5:55:42		1.5	1.7
HON Гоналулу	49.45	5:52:44		HON	5:52:46		5	
IQA Канада	57.13	5:53:59	6:00:55	*SFJD	5:53:38	6:00:49	0.2	0.5
KDU Австралия	69.97	5:55:00		GMM	5:55:00		1.75	
LRM Австралия	84.22	5:56:24	6:05:58				0.5	0.8
MEA Канада	49.72	5:52:51	5:59:20				1.75	7
NEW США	52.25	5:53:10		NEW	5:53:07		2	
OTT Канада	71.64	5:55:20	6:03:46	G55A	5:55:10		1.25	0.75
RES Канада	42.96	5:52:07	5:57:47	RES	5:51:58	5:57:45	0.5	2.5
SHU Аляска	25.98	5:49:37	5:53:42	SDPT	5:49:34		3	5.5
SJG Пуэрто-Рико	99.82	5:57:53	6:07:25	SJG	5:57:30	6:07:10	0.1	0.5
STJ Канада	75.33	5:55:56	6:04:35				0.35	1.25
TUC США	67.45	5:54:50		TUC	5:54:46		0.75	
UPS Швеция	60.08	5:54:00	6:01:34	*HFS	5:54:04	6:01:37	0.45	1.5
VIC Канада	48.96	5:52:49	5:59:20	PGS	5:52:43		1	1
YKC Канада	44.40	5:52:10	5:58:03	YKA	5:52:09	5:58:00	0.2	2

Также в таблице 1 приведены значения амплитуды колебаний, определенные приблизительно по записи магнитных колебаний.

Из 56 работавших 24.05.2013 секундных станций сети «Интермагнет» эффект был зарегистрирован на 26 станциях. Факт и причина отсутствия сигнала, как мы увидим в дальнейшем, также заслуживает внимания. Ниже приводится список «не среагировавших» на данное землетрясение геомагнитных станций:

AAE-Эфиопия; AMS-Остров Амстердам; BRW-Аляска (Уткиагвик); CLF-Франция; CNB-Канберра (Австралия); CSY-Антарктида; CTA-Квинсленд (Австралия); CZT-Антарктида; DLT-Далат (Вьетнам); DMS-Антарктида; DRV-

ОТКЛИК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЛУБОКОФОКУСНОЕ ОХОТОМОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2013 ГОДА С $M = 8.3$

Антарктида; FRN-Фресно (США); GNG-Калимантан (Индонезия); GUA-Гуам; IPM-Остров Пасхи; КАК-Какиока (Япония); KNY-Каноя (Япония); KOU-Куру (Французская Гвиана); LZH-Ланджоу (Китай); MAW-Антарктида; MBO-Мобур (Сенегал); MCQ-Маккуори; MMB Мемамбетцу (Япония); PAF-о Кергелен (Франция); PEG-Греция; PHU-Пху Тху (Вьетнам); PPT- Полинезия (Франция); SBA Антарктида; SIT-Ситка (США); TAM-Алжир.

Подтверждается «немагнитность» ст. CNB (Канберра) и MCQ (Маккуори) — причина отсутствия отклика на Новозеландское землетрясение 13.11.2016. Кроме того, после получения этих результатов был найден отклик на землетрясение 13.11.2016 на австралийских станциях ASP, LRM и KDU, которые находятся гораздо дальше от Новой Зеландии, чем CNB.

Таким образом, рассматриваемый сейсмомагнитный эффект возникает в непосредственной близости геомагнитной станции при достижении ее или ее окрестностей сейсмической волной. Время задержки соответствует эффективной скорости распространения P -волны примерно 14 км/с (предельная скорость в нижней мантии [8]).

На рис. 3 приведена зависимость времени задержки (по оси X) от расстояния в градусах от эпицентра до геомагнитной станции (по оси Y) отдельно для сигналов от P - и S -волн. Фактически это зависимость расстояния, пройденного сейсмическими волнами, от времени. Примерное значение отношения скоростей продольных и поперечных волн, вычисленное как отношение двух соответствующих тангенсов углов наклона результирующих линий, равно 1.82, что характерно для мантии [8]. Рядом с каждой точкой на рис. 3 приведен международный код станции в сети «Интермагнет», что иллюстрирует одинаковый ход зависимости в разных частях света.

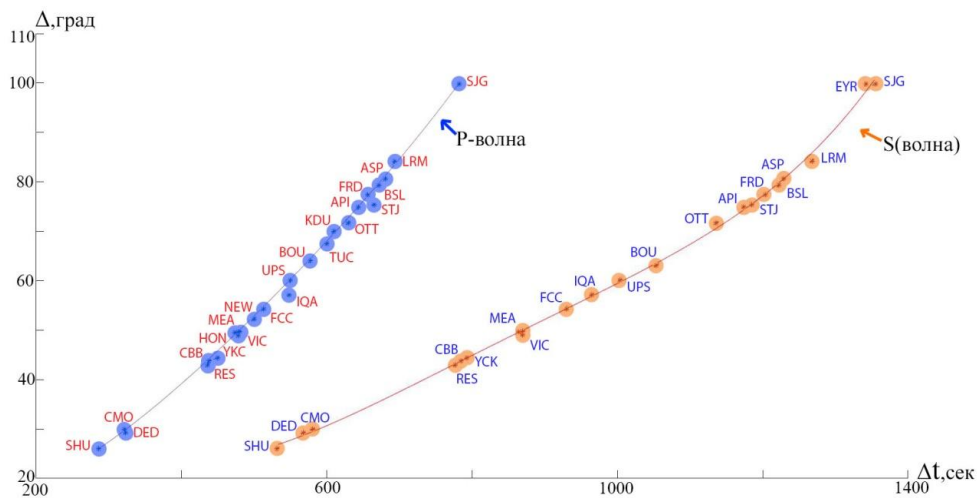


Рис. 3. Зависимость времени задержки отклика, соответствующего P - и S -волнам, от расстояния в градусах до эпицентра землетрясения для каждой станции, зарегистрировавшей отклик. Буквами обозначен международный код станции.

На рис. 4 показаны примерные амплитуды сейсмомагнитного сигнала, соответствующие S -волнам, в зависимости от расстояния в градусах до геомагнитной станции. Из табл. 1 и рис. 4 видно, что амплитуда записи не коррелирует с расстоянием до станции. Учитывая, что более половины станций вне зависимости от расстояния не обнаружили никакого эффекта, все эти результаты могут быть объяснены предположением, что рассмотренные вариации геомагнитного поля вызваны откликом среды, обладающей (или не обладающей) в данном районе остаточной намагниченностью горных пород, на сейсмические волны. Такой механизм возникновения сейсмомагнитного эффекта упоминался ранее [3], но не получил, с нашей точки зрения, должного внимания. В случае принятия этого утверждения разброс точек от результирующей линии на рис. 3, выходящий за рамки погрешности измерений, легко объясняется. Действительно, принимаемый геомагнитной станцией сигнал излучает область с остаточной намагниченностью, находящейся на некотором расстоянии от станции и в произвольном азимуте относительно направления на станцию. Вследствие этого возможны случаи, когда сейсмомагнитный сигнал, распространяющийся со скоростью света, опережает сейсмическую волну или отстает от нее.

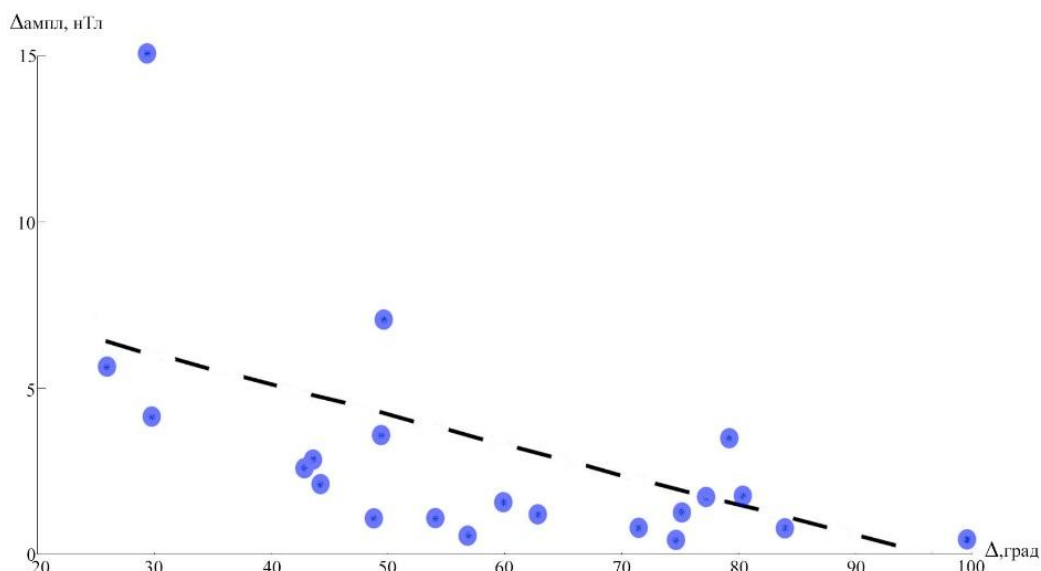


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала отклика на S -волну от расстояния до станции.

Для объяснения разброса амплитуд сейсмомагнитного эффекта можно предположить, что амплитуды уменьшаются с отдалением от эпицентра и меняются в зависимости от расстояния от «излучающего» объекта до станции и от мощности залегания магнитных материалов. Наблюдаются случайные сильные отклонения на фоне общего убывания. Здесь необходимо сделать оговорку, что на рис. 4 большие отклонения от трендовой линии возможны также в случае неверно интерпретированной фазы на магнитной записи вследствие недостаточности

ОТКЛИК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЛУБОКОФОКУСНОЕ ОХОТОМОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2013 ГОДА С $M = 8.3$

исходного материала.

Теория [1, 2, 3] говорит нам, что с учетом механизмов преобразования сейсмической энергии в электромагнитную, источниками сейсмомагнитного сигнала являются неоднородности, разломы, трещины в горных породах, заполненные флюидом. Однако в этом случае не понятно «молчание» Японии на всех 3-х станциях, Гуама, Маккуори (станций в сейсмичных районах) и наоборот, наличие отклика в несейсмичных районах: Австралии, Канады, Швеции. Еще одним свидетельством в пользу предложенной нами модели является установленный факт, что вариации, приведенные на рис. 1, наблюдаются также синхронно на Y- и Z-компонентах, при этом модуль вариаций постоянен. Происходит колебательное вращение вектора намагниченности. По нашему мнению это свидетельствует об однодоменном состоянии зерен магнитных минералов, что характерно для всех ферритмагнетиков в горных породах при достаточно малых размерах зерен [9]. Для проверки предложенной модели для каждой станции по материалам сайта www.wDmat.org было проведено предварительное исследование соответствия наличия отклика с наличием в районе станции аномалии геомагнитного поля. Установлено, что практически все станции, продемонстрировавшие сейсмомагнитный эффект, расположены вблизи аномалий, причем как положительных, так и отрицательных. На рис. 5 приведена карта аномального магнитного поля вблизи станции DED (Северная Аляска), где наблюдается наибольший отклик.

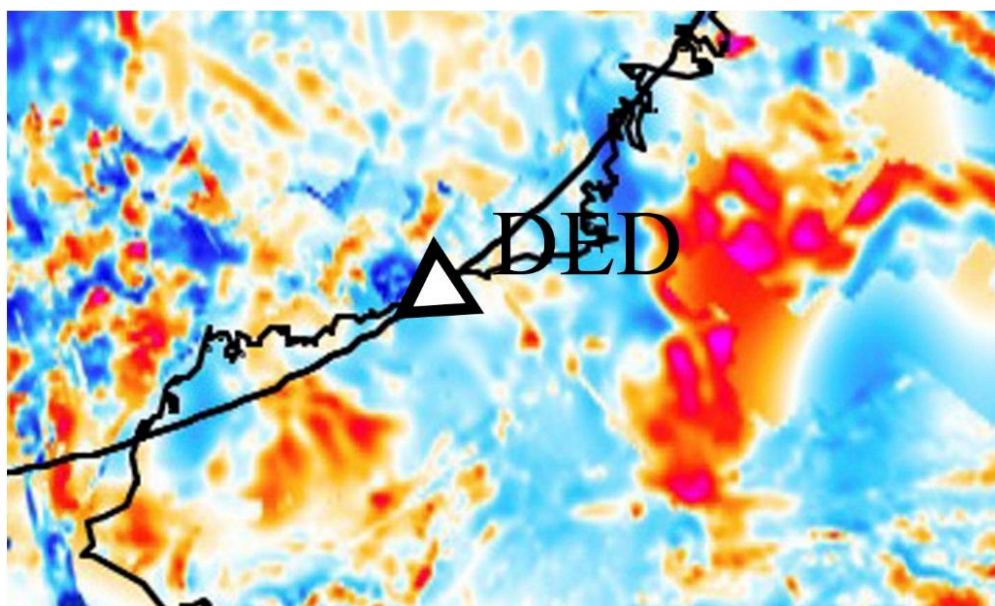


Рис. 5. Аномальное магнитное поле в районе ст. DED. Синим и красным цветом обозначены отрицательные и положительные аномалии соответственно.

Станция находится на сильной (-300 нТл) отрицательной аномалии. Однако существует большое количество станций без отклика на данное землетрясение, несмотря на наличие вблизи аномальных зон, например, станции Японии, Маккуори, Гуам. По-видимому, необходимо более тщательное исследование распределения аномального магнитного поля. Возможно также, что отсутствие сигнала объясняется невосприимчивостью магнитных минералов в этих районах к таким уровням воздействия вследствие, например, наличия доменной структуры в сочетании с большой коэрцитивной силой.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе установлено следующее.

1. Сейсмомагнитный сигнал с периодами в диапазоне $1-10$ с возникает вблизи геомагнитной станции при достижении ее окрестностей сейсмических волн.

2. Источником сигнала предположительно являются магнитные минералы горных пород в районе станций.

3. По крайней мере, в некоторых рассматриваемых случаях зерна магнитных минералов находятся в монодоменном состоянии, требуются дальнейшие исследования.

4. Существует прямая связь между наличием рассмотренного сейсмомагнитного эффекта и расположением зон аномального магнитного поля.

Монодоменность зерен минералов может свидетельствовать в различных районах о конкретных наименованиях минералов и размерах зерен, что может быть проверено в дальнейшем или соотнесено с существующей геологической информацией. В этом направлении предполагается провести дополнительные исследования.

Также, на наш взгляд, необходимо подробнее исследовать возможность возбуждения P - и S -волнами разных (не одних и тех же) участков территории. Необходимость этого видна из сравнения их времен задержки и амплитуд на рис. 3, 4. В настоящий момент представляется возможным «запеленговать» по временам задержки конкретные аномальные области в сейсмических районах при рассмотрении множества землетрясений вокруг одной или нескольких станций.

С физической точки зрения полученный результат не меняет существующего представления о механизмах возникновения сейсмомагнитного эффекта. Магнитные минералы горных пород, по-видимому, лишь откликаются на возникающие слабые магнитные поля и «обнаруживают» их. В случае пьезомагнитного эффекта следовало бы ожидать проявления вариаций на модуле геомагнитного поля. Для нас важным практическим выводом может быть связь между наличием аномальной зоны в конкретном районе и возможностью появления геомагнитных предвестников. Но существование такой связи еще предстоит выяснить. Проведенная работа является первым шагом в этом направлении.

Авторы выражают благодарность Пустовитенко Б. Г. за идею работы, ценные замечания и обсуждение результатов.

ОТКЛИК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЛУБОКОФОКУСНОЕ ОХОТОМОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2013 ГОДА С $M = 8.3$

Список литературы

1. Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. 448 с.
2. Гульельми А. В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и магнитосфере Земли // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 12. С. 1257–1276.
3. Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. М.: Ин-т Физики Земли РАН, 1995. 38 с.
4. Гульельми А. В., Потапов А. С., Цэгмед Б. О возбуждении колебаний магнитного поля волной Лява // Физика Земли. 2002. № 3. С. 48–54.
5. Спивак А. А., Рябова С. А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019. № 6. С. 3–12.
6. Довбня Б. В., Пашинин А. Ю., Рахматулин Р. А. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 731–740.
7. Чеброва А. Ю., Чебров В. Н., Гусев А. А. и др. Воздействие охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. ($M = 8.3$) на территории Камчатки и Мира // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 3–22.
8. Буллен К. Е. Введение в теоретическую сейсмологию. М.: Мир, 1966. 460 с.
9. Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.

GEOMAGNETIC FIELD RESPONSE TO THE 2013 DEEP-FOCUS EARTHQUAKE IN THE SEA OF OKHOTSK WITH $M = 8.3$

Burym Yu. A., Samsonov K. A.

*State Autonomous Institution «Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities», Simferopol, Republic of Crimea, Russia.
E-mail: seismoexpert@gmail.com*

Using the data of the Internet resource «intermagnet.org», the response of the geomagnetic field to the deep-focus earthquake of May 24, 2013 was analyzed. The response was recorded all over the world by stations with every second registration of 3 field components. Out of 56 operating stations, the effect was recorded only at 26 stations, regardless of their location. The moment of occurrence of the response in the range of periods of 1–10 seconds coincides with the time of arrival of seismic waves in the area of each station. Consequently, a seismomagnetic signal arises near a geomagnetic station when seismic waves reach its surroundings.

The amplitude of the response does not correlate with the epicentral distance; with increasing distance random large deviations are observed against the background of a general decrease. It is concluded that the source of the signal is magnetic minerals of rocks in the area of the stations. Therefore, the response amplitude depends on the distance between the geomagnetic station and the location of the magnetic anomaly, as well as the power of the magnetic anomaly.

This conclusion is partially confirmed by the analysis of the location of the stations on the map of the anomalous magnetic field based on the materials of the site (www.wdmam.org). A direct relationship is observed between the presence of the considered seismomagnetic effect and the location of the anomalous magnetic field zones. The considered variations are recorded on all components of the geomagnetic field synchronously, while they are absent from the record of the absolute value of the field variations. This indicates that the grains of magnetic minerals are in a single-domain state,

which is typical for all ferrimagnets in rocks with sufficiently small grain sizes. In the future, it is planned to check the compliance of this statement with the existing geological information on the specific names of minerals in various regions.

There are a large number of stations without a response to this earthquake, despite the presence of anomalous zones nearby. For example, the stations of Japan, Macquarie, Guam. Apparently, a more thorough study of the distribution of the anomalous magnetic field is needed. It is also possible that the absence of a signal is due to the insensitivity of magnetic minerals in these regions to such levels of impact due, for example, to the presence of a domain structure in combination with a high coercive force.

At the moment, it seems possible to «track» by delay times specific anomalous regions in seismic regions when considering a multitude of earthquakes around one or several stations. At the same time, it is necessary to study in more detail the possibility of excitation by *P*- and *S*-waves of different (not the same) parts of the territory.

From a physical point of view, the result obtained does not change the existing understanding of the mechanisms of the seismomagnetic effect. The magnetic minerals of rocks, apparently, only respond to the emerging weak magnetic fields and «detect» them. In the case of the piezomagnetic effect, one would expect the manifestation of variations in the modulus of variations in the geomagnetic field. An important practical conclusion may be the connection between the presence of an anomalous zone in a specific area and the possibility of the appearance of geomagnetic precursors. But the existence of such a connection remains to be seen. The work done is the first step in this direction.

Keywords: variations in the geomagnetic field, earthquake precursors, magnetic minerals.

References

1. Surkov V. V. Elektromagnitnye efekty pri zemletryasenyah i vzryvah (Electromagnetic effects during earthquakes and explosions). Moscow, MIFI Publ., 2000, 448 p. (in Russian).
2. Gul'el'mi A. V. Ul'tranizkochastotnye elektromagnitnye volny v kore i magnitosfere Zemli (Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the Earth's crust and magnetosphere). *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2007, V. 177, no 12, pp. 1257–1276 (in Russian).
3. Levshenko V. T. Sverhnizkochastotnye elektromagnitnye signaly litosfernogo proiskhozhdeniya (Ultra-low-frequency electromagnetic signals of lithospheric origin). PhD thesis. Moscow, In-t Fiziki Zemli RAN, 1995, 38 p. (in Russian).
4. Gul'el'mi A. V., Potapov A. S., Cegmed B. O возбуждении колебаний магнитного поля волной Лява (Excitation of magnetic field oscillations by a Love wave). *Fizika Zemli*, 2002, no 3, pp. 48–54 (in Russian).
5. Spivak A. A., Ryabova S. A. Geomagnitnye variatsii pri sil'nykh zemletryasenyah (Geomagnetic variations during strong earthquakes). *Fizika Zemli*, 2019, no 6, pp.3–12 (in Russian).
6. Dovbnya B. V., Pashinin A. Yu., Rahmatulin R. A. Kratkosrochnye elektromagnitnye predvestniki zemletrjasenij (Short-term electromagnetic earthquake precursors). *Geodinamika i tektonofizika*, 2019, V. 10, no 3, pp. 731–740 (in Russian).
7. Chebrova A. Yu., Chebrov V. N., Gusev A. A. Vozdejstvie ohotomorskogo zemletrasyeniya 24 maya 2013 g. ($M=8.3$) na territorii Kamchatki i Mira (Impact of the Sea of Okhotsk earthquake on May 24, 2013 ($M=8.3$) on the territory of Kamchatka and World). *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 2015, no 4, pp. 3–22 (in Russian).
8. Bullen K. E. Vvedenie v teoreticheskuyu sejsmologiyu (Introduction to Theoretical Seismology). Moscow, Mir Publ., 1966, 460 p. (in Russian).
9. Hramov A. N., Goncharov G. I., Komissarova R. A. Paleomagnitologiya (Paleomagnetology). Leningrad, Nedra Publ., 1982, 312 p. (in Russian).