

Аномальные геомагнитные возмущения, наведенные катастрофическими цунамигенными землетрясениями в районе Индонезии

© *Л. Е. Собисевич¹, А. Л. Собисевич¹, К. Х. Канониди², 2012*

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

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, Москва, Россия

Поступила 4 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Виконано аналіз геомагнітних варіацій, зафіксованих станціями Північнокавказької обсерваторії (Ельбруська вулканічна область). Виділено аномальні "квазігармонічні" магнітні збурення, які спостерігали на всіх етапах розвитку катастрофічних цунамігенних землетрусів у районі Індонезії, та описано морфологічні ефекти у варіаційній структурі геомагнітного поля Землі. Згідно з експериментальними результатами, складено загальне уявлення про геомагнітну активність і деякі особливості наведених геомагнітних збурень, які пов'язані з цунамігенними землетрусами. В усіх спостережувальних випадках сейсмічні події відбулися за характерних співвідношень між компонентами магнітного поля: в структурі магнітних варіацій вдалося виділити ультранизькочастотні квазігармонічні хвильові форми геомагнітних збурень, які відображають умови підготовки й розвитку цунамігенного землетрусу в досліджуваному регіоні. У статті не йдеться про прогноз цунамігенних землетрусів, оскільки, якщо і виділити у геомагнітному полі характерні ознаки, що передують початку сейсмічної події, залишаються поки не визначеними координати і час у вогнищі.

Analysis of geomagnetic variations registered by the stations of the North-Caucasian geophysical observatory (the Elbrus volcanic area) has been fulfilled. Anomalous "quasi-harmonic" magnetic disturbances have been distinguished which were observed during all the stages of development of catastrophic tsunami-producing earthquakes in the area of Indonesia and morphologic effects in variation structure of geomagnetic field of the Earth have been described. Experimental results cited permit to obtain general idea on geomagnetic activity and some features of induced geomagnetic disturbances which we refer to tsunami-producing earthquakes. In all the observed cases seismic events occurred under the conditions of specific ratios between the components of magnetic field; it has been found that in the structure of magnetic variations we succeeded to distinguish ultra-low-frequency quasi-harmonic wave forms of geomagnetic disturbances reflecting the conditions of preparation and development of tsunami-producing earthquake in the studied region. We do not consider in the paper the forecast of tsunamiproducing earthquakes because even if we can distinguish in geomagnetic field some specific indications, in the source preceding the start of seismic event its coordinates and time in the source are left uncertain so far.

Аномальные геомагнитные возмущения, предвещающие сильное сейсмическое событие, обнаружил известный ученый Джордж Мур, которому удалось впервые выделить характерные волновые формы. Эти сигналы были зафиксированы за 2 ч до начала катастрофического цунамигенного землетрясения на Аляске 27 марта 1964 г. Открытие послужило началом работ по изучению электромагнитных "предвестников" землетрясений. Обнаруженное явление специалисты восприняли

неоднозначно. В известной статье американского ученого затронутая проблема детально анализируется [Fraser-Smith, 2008]. Замеченные "связи" сильных землетрясений с магнитными бурями и другими процессами в ионосфере, атмосфере и литосфере побудили геофизиков расширить фронт работ по изучению аномальных геомагнитных возмущений. В некоторых научных работах приведены данные о том, что крупные сейсмические события отмечаются чаще всего в равновесии на фоне



Рис. 1. Лаборатория № 1 Северокавказской геофизической обсерватории, заглубленная на 1,5 км под г. Андырчи. Эльбрусский вулканический центр. Координаты обсерватории: 43° 16' с. ш.; 42° 41' в. д. На переднем плане — магнитовариационная станция системы В. Н. Боброва, на заднем — наклонмеры системы Д. Г. Гриднева.



Рис. 2. Лаборатория № 2 Северокавказской геофизической обсерватории. Эльбрусский вулканический центр, уникальный по структуре объект. Углубление под г. Андырчи 4,1 км. Глубина боковой вырубке в штольне "Вспомогательная" — 80 м. Геофизическая аппаратура (наклономеры, гравиметры, магнитные вариометры) размещена на двух бетонных постаментах. Низкий уровень помех приему полезной геофизической информации, стабильный температурный режим (38 °С) позволяют вести здесь широкий спектр геофизических наблюдений.

проявления сопутствующих сильных геомагнитных бурь [Сытинский, 1987; Барсуков, 1991]. Феноменологические модели подготовки тектонического землетрясения в конкретном регионе, в основу которых заложены данные натуральных наблюдений, предполагают наличие в качестве предвестника тектономагнитного эффекта в виде вариаций, обусловленных неким внутренним источником, расположенным в земной коре [Седова и др., 2001]. Существуют подходы, в которых пытаются связать сейсмическую активность Земли с воздействием Солнца, влиянием ионосферы и другими явлениями в геосферах Земли [Гогатишвили, 1984; Липеровский и др., 1991; Моргунов, 1999; Седова и др., 2001; Гульельми, 2007 и др.]. Заслуживают внимания работы ученых из Санкт-Петербурга, которые разработали новый класс магнитных вариометров и проверили на практике технологию локации очага готовящегося сейсмического события [Копытенко и др., 2000].

Опыт наблюдений на Северокавказской геофизической обсерватории, расположенной в районе Эльбрусского вулканического центра (рис. 1, 2), свидетельствует о том, что изучаемый отдельный класс электромагнитных ультранизкочастотных (УНЧ) возмущений перед сильными землетрясениями весьма информативен и поддается регистрации современными геофизическими комплексами [Собисевич и др., 2008; 2009; Собисевич, 2010].

В качестве примера обратимся к катастрофическому Суматро-Адаманскому землетрясению (магнитуда этого события по разным оценкам составила 9,1—9,3), которое произошло в районе Северной Суматры 26 декабря 2004 г. (рис. 3). Характеризуя особенности наблюдае-



Рис. 3. Район проявления цунамигенного землетрясения в Индонезии, которое произошло 26.12.2004 г. в 00:58:53 UTS; 07:58:53 по местному времени. Землетрясение стало причиной цунами, признанного самым смертоносным стихийным бедствием в современной истории сейсмических катастроф. Магнитуда по разным оценкам составляла от 9,1 до 9,3. Это второе или третье по силе землетрясение за всю историю сейсмических наблюдений.

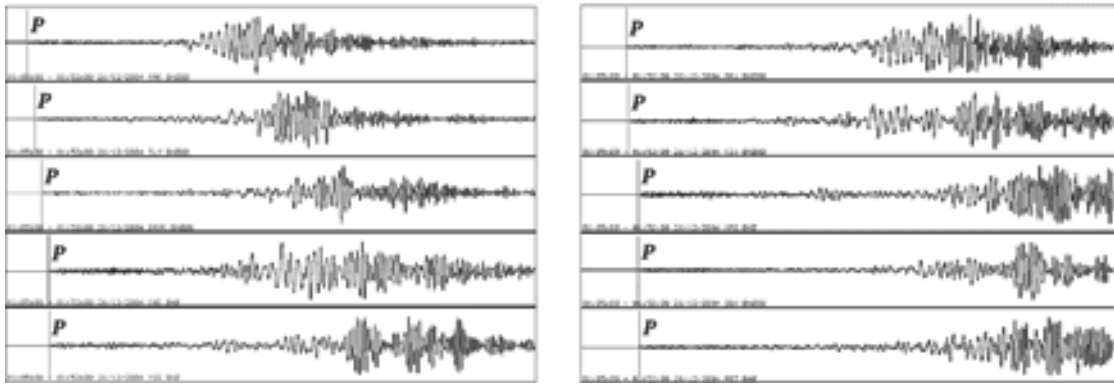


Рис. 4. Фрагменты сейсмограмм анализируемого сейсмического события.

мых аномальных возмущений магнитного поля Земли, предвещающих сейсмическое событие такого масштаба, отметим некоторые наиболее интересные, с нашей точки зрения, волновые формы, проявившиеся при анализе записей магнитных вариометров Северокавказской геофизической обсерватории. Расшифровка структуры зарегистрированных квазигармонических магнитных возмущений показывает, что на всех этапах подготовки и развития цунамигенного землетрясения аппаратными комплексами удается выделить и зафиксировать в магнитном поле Земли характерные "квазигармонические" волновые формы, появление которых свидетельствует о развитии сложных электродинамических процессов в системе литосфера — атмосфера — ионосфера.

Параметры анализируемого землетрясения были определены в Службе срочных донесе-

ний (ССД) Информационно-обрабатывающего центра (ИОЦ) Геофизической службы РАН (г. Обнинск) с использованием данных, полученных стационарными цифровыми и аналоговыми сейсмическими станциями России, стран СНГ и зарубежья (табл. 1).

На рис. 4 представлены фрагменты записей землетрясения на цифровых станциях: Ала-Арча (дельта 43,5 градуса), Талая (дельта 48,6 градуса), Боровое (дельта 53,8 градуса), Гарни (дельта 58,8 градуса), Южно-Сахалинск (дельта 59,4 градуса), Арти (дельта 60,7 градуса), Кисловодск (дельта 61,8 градуса), Магадан (дельта 70 градусов), Обнинск (дельта 70 градусов), Петропавловск-Камчатский (дельта 71,2 градуса).

Первый удар потряс северную часть о-ва Суматра, затем цепочка землетрясений продолжилась вдоль главного тектонического раз-

Т а б л и ц а 1. Основные параметры катастрофического события, зафиксированного сейсмологическими центрами

Время в очаге, GMT	Широта, градусы	Долгота, градусы	Глубина, км	Количество станций	Ms/N	mb/N	I ₀ расчетные	GAP	Центр
00-58-51.70	3,4	95,84	33	37	8,8/15	6,7/15	10—11	75	ИОЦ ГС РАН (предварительный)
00-58-48.20	3,39	95,84	10	39	8,80/16	6,70/15	12,5—13,0	75	ИОЦ ГС РАН (уточненный)
00-58-50.70	3,5	95,72	10	288	Mw8,9	5,6—7,3/8	—	61	CSEM
00-58-50.76	3,298	95,778	10	157	8,5/38	6,3/55	—	—	NEIC (предварительный)
00-58-49.80	3,244	95,825	10	223	8,8/110	6,4/66	—	29	NEIC (уточненный)

Примечание. ИОЦ ГС РАН — Информационно-обрабатывающий центр Геофизической службы Российской академии наук. CSEM — Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр. NEIC — Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США.

лома. Толчки фиксировались вплоть до Никобарских и Андаманских островов. Мощные приливные волны высотой до 10 м и более обрушились на побережье Шри-Ланки, Индии, Индонезии, Таиланда, Малайзии. Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками.

Эпицентр анализируемого сейсмического события располагался на фланге Зондской сейсмической области, огибающем с запада острова Суматра, Никобарские и Андаманские. Этот участок Зондской дуги геотектоники определяют как область косой субдукции. Здесь Индо-Австралийская плита движется на север, а Бирманская — вдоль Андамано-Никобарского и Центрально-Суматранского правосдвиговых разломов на юго-юго-восток. Образованная структура, по нашему мнению, является определяющей с точки зрения генерации аномальных УНЧ геомагнитных возмущений.

Механизм очага, по данным сейсмического центра Гарвардского университета, оказался достаточно типичным для данного участка субдукционной зоны. Моделирование этого сейсмического события, выполненное учеными ИФЗ РАН, показывает, что в качестве разрыва здесь реализована субполюгая нодальная плоскость.

Землетрясение произошло в сейсмически активном регионе, для которого составлен каталог сейсмических событий, произошедших с 1971 г. по октябрь 2004 г., с глубиной гипоцентров менее 150 км. Анализ данных из указанного каталога позволил Ю. Л. Ребецкому и его сотрудникам осуществить реконструкцию напряжений для двух глубинных диапазонов: условная земная кора 0—60 км (220 событий) и глубинная часть 40—150 км (80 событий). Получены проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений и установлено, что к юго-востоку от начала "вспарывания" разрыва проекции максимальных и минимальных напряжений на горизонтальную плоскость субнормальны, а промежуточного главного напряжения — параллельны простиранию оси желоба. Оси максимального девиаторного сжатия имеют пологий наклон под океаническую литосферную плиту, а оси максимального девиаторного растяжения круто погружены под континентальную плиту. Это типичная субдукционная обстановка, определяемая как обстановка горизонтального сжатия, со строго выдержанной субнормальной к простиранию оси желоба ориентацией. Ориентация векторов напряжений соответствует направлению действия конвекционных потоков под океанической плитой. Далее,

по мере продвижения вдоль западного фланга Зондской субдукционной зоны с юга на север, удастся наблюдать последовательную смену режимов напряженного состояния от субдукционного (горизонтальное сжатие) до горизонтального растяжения.

Сейсмологи полагают, что именно движение этой плиты определяет правосдвиговую кинематику Андамано-Никобарского и Центрально-Суматранского разломов и особенности режима напряженного состояния в континентальной части земной коры региона. Кроме того, смена ориентации главных осей напряжений на участке от начала "вспарывания" разрыва до сейсмофокальной области задугового бассейна показывает, что она достаточно хорошо соответствует наблюдаемой ориентации осей главных напряжений вблизи трещины сдвига.

Факт возникновения сильного землетрясения в области высокого градиента напряжений заставляет уточнить современные взгляды на некоторые особенности геодинамических процессов, ответственных за подготовку крупного цунамигенного землетрясения, в которых доминируют представления о повышении интенсивности напряжений во всей области будущего сейсмического события до предельных значений.

Можно предположить, что именно наличие близко расположенных областей высоких и низких напряжений как один из определяющих факторов проявления сложных геолого-геоэлектрических процессов, энергия которых резко превышает уровень энергии основных сильных событий в сейсмоактивных объемах земной коры, вызывает масштабную электризацию флюидонасыщенных разломно-блоковых структур океанического дна в зоне подготовки цунамигенного землетрясения. В свете современных представлений эти области могут быть смоделированы соответствующими образованиями дилатансного типа [Алексеев и др., 2008; Собисевич, 2010; Николаевский, 2011]. Взаимодействие наэлектризованных отдельных в эпицентральной области и в зонах разломно-блоковых структур (разрывов) на прилегающих к эпицентру участках геологической среды было, по нашему мнению, источником геоэлектрических процессов, ответственных за появление аномальных магнитных возмущений, наблюдаемых на всех этапах подготовки и протекания рассматриваемого цунамигенного землетрясения.

Таким образом, в результате электризации отдельных областей разломно-блоковой геоло-

гической среды, для которых характерно наличие распределенных структур дилатансного типа с присущими им резонансными особенностями [Собисевич, 2010], появляются условия, способствующие генерации аномальных геомагнитных УНЧ-возмущений, которые отражают динамику резонансной разломноблоковой структуры очаговой зоны. Чтобы убедиться в этом, обратимся к данным натурных экспериментов, которые были получены в Северокавказской геофизической обсерватории.

В обсерватории нами принята система координат, приведенная на рис. 5. При этом все магнитовариационные станции ориентируются на магнитный полюс. Вариации горизонтальных составляющих принято обозначать H и D . Хотя в действительности они отличаются от принятых обозначений, но, используя математические преобразования, всегда можно получить реальные значения вариаций H и D . В дальнейшем на записях: H -компонента — показания вариационной станции, D -компонента — не угол, а показания вариационной станции в горизонтальной плоскости, перпендикулярной к H -компоненте. Зафиксированные аппаратурными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории, в процессе развития Суматро-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 г., магнитограммы и данные наклономеров представлены на рис.6.

Характерные структуры магнитного сигнала, классифицируемые как аномальные УНЧ геомагнитные возмущения, определяются, по нашему мнению, развивающимися токовыми системами в зоне подготовки этого катастрофического сейсмического события. На записях они отчетливо начали проявляться начиная с 14 ч 40 мин 24 декабря 2004 г.

Анализ полученных магнитограмм позволяет выделить несколько временных интервалов, на которых аномальные УНЧ геомагнитные возмущения проявились наиболее отчетливо. Они определены нами, начиная с 00.00 ч в период с 24 на 25 декабря (рис. 6). Время здесь и далее по тексту мировое. В представленных записях вариаций магнитного поля Земли (H , D , Z) и наклонов (EW) земной поверхности, отражающих этапы подготовки и развития анализируемого сейсмического процесса, удастся (при заданной чувствительности магнитных вариометров) исследовать аномальные УНЧ геомагнитные возмущения, появление которых связано с начальными этапами развития цунамигенного землетрясения. На рис. 6 серым цветом выделены два временных интервала, где

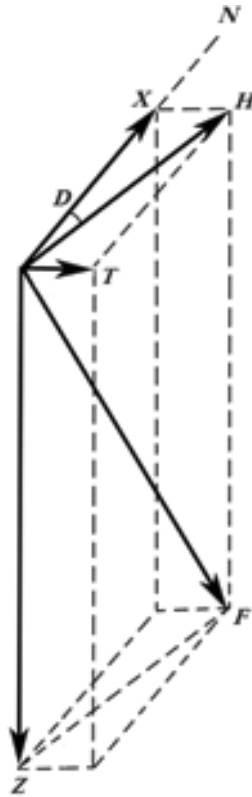


Рис. 5. Магнитная система координат: F — вектор магнитного поля Земли; H — горизонтальная составляющая вектора магнитного поля Земли на горизонтальную плоскость, за положительное принято направление с юга на север; D — угол между горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и географическим меридианом, за положительное принято направление с запада на восток; Z — вертикальная составляющая вектора магнитного поля Земли, за положительное принято направление сверху вниз.

наиболее отчетливо проявились указанные выше характерные квазигармонические магнитные возмущения. Отметим, что эти возмущения наблюдаются и в других временных интервалах. Они практически не различаются по своей структуре, только амплитуда их значительно меньше. В дальнейшем мы намерены их детально изучить с привлечением сопоставительных данных о динамических процессах в эпицентральной зоне.

Обратимся теперь к аномальной УНЧ геомагнитной пульсации, которая развивалась в период начиная от 23 ч 58 мин 24 декабря до 00 ч 23 мин 25 декабря 2004 г. (рис. 6, вставки 2, 4). Волновые формы аномального УНЧ геомагнитного возмущения, предвещающего непосредственно сейсмический удар, показаны на

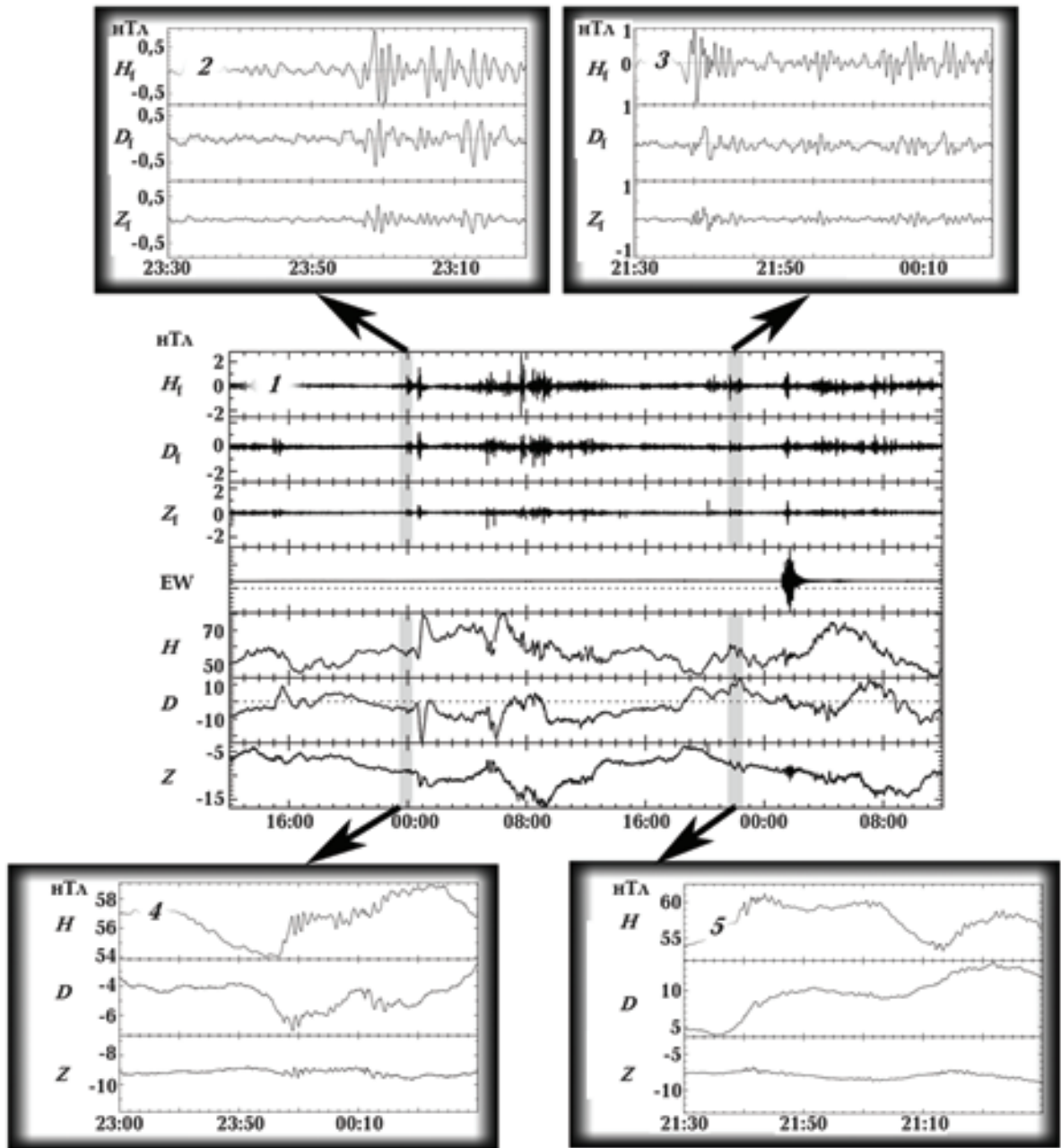


Рис. 6. Запись вариаций магнитного поля и наклонов земной поверхности на этапах подготовки и развития землетрясения в районе о-ва Суматра 26 декабря 2004 г. Вставки 2, 4 — характерные волновые формы аномальных УНЧ квазигармонических магнитных возмущений, которые наблюдались на этапах подготовки и развития землетрясения; вставки 3, 5 — волновые формы аномального ультранизкочастотного магнитного возмущения, проявившиеся за час до землетрясения; EW — показания наклономера запад — восток; H , D , Z — вариации магнитного поля Земли; H_f , D_f , Z_f — вариации магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне 18—300 с.

рис. 6 (вставка 3, 5). В обоих случаях была выполнена операция расширения временного диапазона. Характеризуя процесс зарождения и развития возмущений в вариациях магнитного поля Земли, отметим, что амплитуда "квазистатического" сигнала колебалась здесь в пре-

делах 0,5—1,2 нТл, а период изменялся в диапазоне от 1 до 2 мин.

Волновые формы, полученные после фильтрации возмущения в диапазоне периодов 18—300 с (рис. 6, вставки 2, 3), отчетливо иллюстрируют тонкую структуру аномального УНЧ

геомагнитного возмущения, предваряющего цунамигенное землетрясение.

Сопоставление приведенных квазипериодических сигналов с данными, полученными перед цунамигенными событиями в других регионах Земли, показало, что наблюдаемые волновые формы заметно различаются и весьма специфичны для каждого отдельно взятого региона Земли [Собисевич, 2010]. Естественно полагать, что подобного рода аномальные УНЧ геомагнитные пульсации отражают геолого-геофизические процессы, развивающиеся в зоне готовящегося сейсмического события.

Характеризуя данное масштабное явление, отметим, что абсолютная величина УНЧ геомагнитного возмущения, зафиксированная приборами Северокавказской геофизической обсерватории, представляет собой, по сути, суперпозицию двух типов волн — атмосферной и земной [Копытенко и др., 2000]. Однако разделить их экспериментально пока не удалось по причине отсутствия необходимого аппаратного обеспечения и соответствующих технологий проведения натурного эксперимента.

Существует мнение, что причины анализируемого явления есть результат развивающейся в области будущего очага аномалии проводимости, а также УНЧ магнитных, инфразвуковых и ионосферных излучений. При этом в процессе изучения выделенных сигналов УНЧ геомагнитные пульсации, наведенные в ионосфере (сигналы типа $Pc4$ и др.), принимались во внимание многими исследователями [Бахмутов, 2001; Бахмутов и др., 2003; Гульельми, 2007; Гульельми, Зотов, 2012; Собисевич и др., 2009; Собисевич, 2010]. Давая оценку пульсациям типа $Pc4$ в сопоставлении с регистрируемыми геомагнитными возмущениями УНЧ-диапазона перед цунамигенными событиями, отметим только, что пока никому не удалось однозначно установить, где расположены сами источники сигналов. В научной литературе отсутствуют достоверные данные о том, что является первичным: магнитные возмущения в ионосфере (типа, например, $Pc4$) или УНЧ геомагнитные возмущения в литосфере, имеющие место на всех этапах развития и протекания сильных землетрясений на суше и в море. Отсутствие такой информации затрудняет успешное решение затронутой проблемы в контексте с прогнозированием крупных сейсмических событий.

В то же время по данным изучения представительного объема экспериментальных записей аномальных УНЧ геомагнитных сигналов,

полученных в течение последних лет наблюдений с использованием аппаратных комплексов, размещенных в лабораториях Северокавказской геофизической обсерватории, с высокой вероятностью можно утверждать, что источник возмущений находится в литосфере (см. табл. 1). При этом генерируемое в зоне готовящегося крупного сейсмического события магнитное возмущение на ионосферу воздействует практически мгновенно. Наведенные характерные волновые формы всегда удается зарегистрировать и выделить на разнесенных пунктах наблюдения, удаленных от эпицентра [Собисевич, 2010].

Сопоставительный анализ данных магнитовариационных измерений с учетом геодинамической обстановки на этапе подготовки и развития Суматро-Андаманского землетрясения и цунамигенных землетрясений в других регионах Земли [Собисевич и др., 2009; Собисевич, 2010] позволил определить представительный класс квазипериодических УНЧ геомагнитных возмущений, предваряющих такие катастрофические сейсмические события. Данные натурных наблюдений приведены в табл. 2. Согласно этим результатам, аномальные УНЧ геомагнитные возмущения, абсолютная величина которых в районе расположения геофизических информационно-измерительных систем (Эльбрусский вулканический центр, Карпогоры и другие пункты наблюдений) колеблется от 0,8 до 4 нТл, формируются, прежде всего, в пределах будущей эпицентральной зоны.

Сопоставим приведенные выше результаты с еще одним цунамигенным землетрясением значительно меньшей магнитуды ($M=6,7$), которое произошло в районе Суматры 16 августа 2009 г. спустя пять лет после Суматро-Андаманского землетрясения. Магнитограммы этого сейсмического события представлены на рис. 7.

Отчетливые аномальные квазигармонические УНЧ геомагнитные возмущения появились здесь за сутки до первого сейсмического удара (рис. 7, вставка 2: сигналы профильтрованы в диапазоне 18—300 с), а их амплитуда не превышала 1 нТл.

Сопоставление магнитограмм двух разномасштабных сейсмических событий позволяет заключить, что наблюдаемые квазигармонические сигналы идентичны. Помимо этого, можно отметить (рис. 7, вставки 2, 3), что период возмущений имеет тенденцию к изменению по мере приближения первого сейсмического удара. Присущие наведенным магнитным возму-

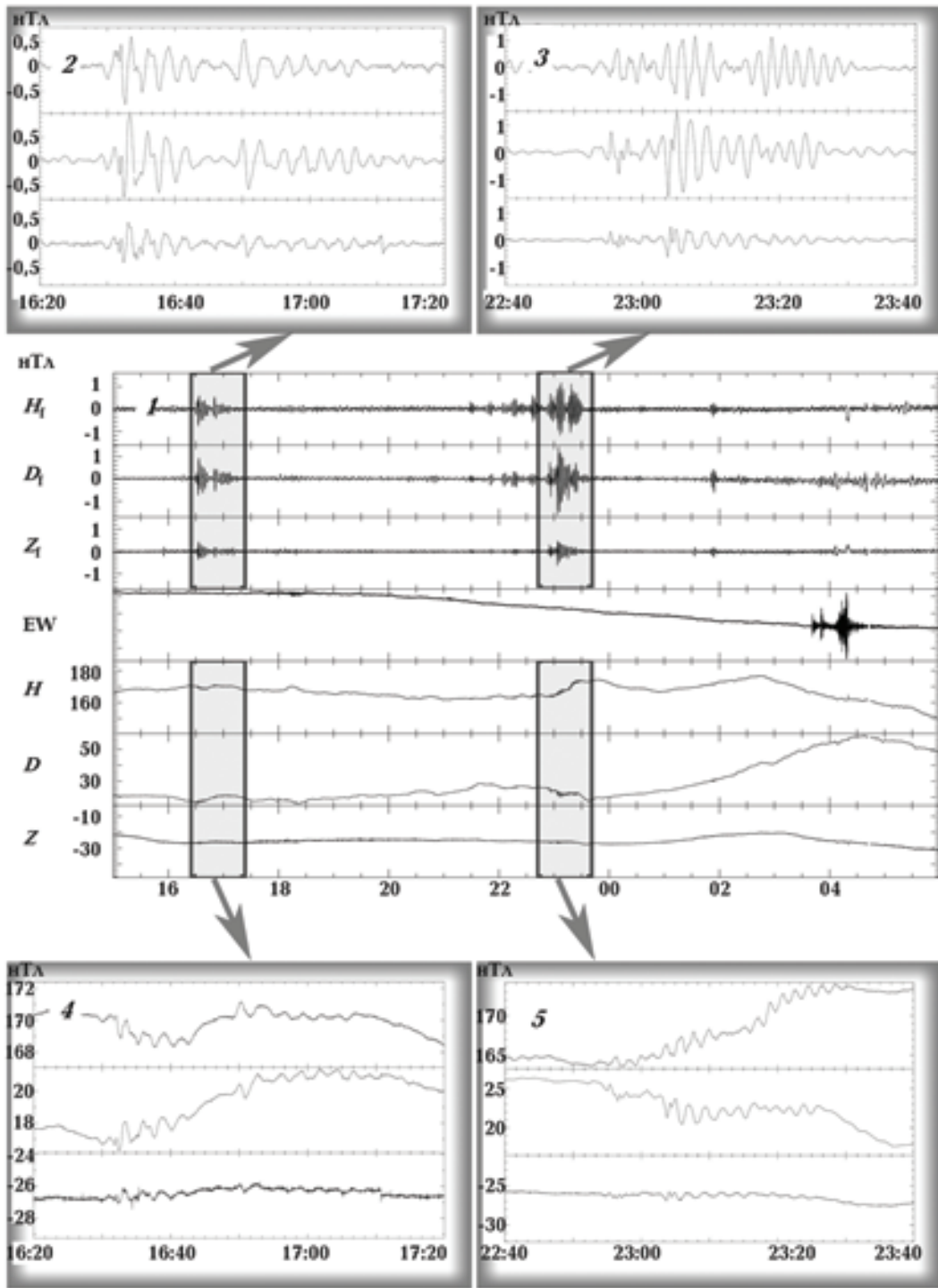


Рис. 7. Магнитограммы цунамигенного землетрясения, которое произошло в районе о-ва Суматра 16 августа 2009 г. На вставках 2 и 3 приведена тонкая структура УНЧ геомагнитных возмущений после фильтрации, на вставках 4 и 5 — развернутые волновые формы зафиксированных геомагнитных возмущений-предвестников. Остальные условные обозначения см. на рис. 6.

щениям особенности, связанные с частотной трансформацией аномальных УНЧ волновых форм, отражают, по нашему мнению, роль резонансных процессов в дилатансных структу-

рах формирующейся эпицентральной области. Восходящие флюидные потоки по-разному трансформируют отдельные дилатансные образования, определяя их структуру и степень

Т а б л и ц а 2. Цунамигенные землетрясения за 2007—2009 гг.

Район	Время, УТ	Координаты	Магнитуда	Глубина, км	Период вариаций, с	Амплитуда сигнала, нТл
Соломоновы острова	01.04.2007 20:39:54,2	8,3° ю. ш. 156,9° в. д.	8,1	10,0	120	1
Япония	16.07.2007 1:13:22,0	37,6° с. ш. 138,5° в. д.	6,6	33,0	80	2,5
Сахалин	02.08.2007 2:37:42,3	47,1° с. ш. 141,7° в. д.	6,2	10,0	60	0,8
Алеутские острова	02.08.2007 3:21:42,8	51,31° с. ш. 180° з. д.	6,7		60	0,8
Побережье Перу	15.08.2007 23:40:56,5	13,5° ю. ш. 76,6° з. д.	8	40	120	1
о-ва Санта-Крус	02.09.2007 01:05:17,5	11,3° ю. ш. 165,8° в. д.	7,2	33,0	60	2
Индонезия	12.09.2007 11:10:23,5	4,4° ю. ш. 101,5° в. д.	8,4	30,0	75	1,8
Новая Зеландия	30.09.2007 05:23:35,3	49,31° ю. ш. 163,8° в. д.	7,4	20	50	3
Северное Чили	14.11.2007 15:40:51,7	22,21° ю. ш. 69,93° з. д.	7,7	60,0	80	2
Фиджи	09.12.2007 07:28:24,0	25,8° ю. ш. 17,5° з. д.	7,8	190,0	190	1,5
Индонезия	25.02.2008 08:36:31,8	2,5° ю. ш. 99,9° в. д.	6,5	33,0	80	3,5
о-ва Лоялти	09.04.2008 12:46:12,5	20,1° ю. ш. 168,9° в. д.	7,3	40,0	66	4
о-ва Вануату	28.04.2008 18:33:34,2	19,68° ю. ш. 168,95° в. д.	6,4	33,0	52	4
Китай	12.05.2008 06:28:00,0	31,2° с. ш. 103,3° в. д.	7,9	10,0	70	4
Япония	19.07.2008 2:29:28,7	37,62° с. ш. 142,2° в. д.	6,9		75	3,6

электризации в области высокого градиента напряжений. При этом механизм разделения зарядов в обозначенных структурах пока не изучен. Можно только говорить о том, что в этом сложном геофизическом процессе не последняя роль должна быть отведена отдельным

локальным геологическим образованиям резонансного типа, активно взаимодействующим при изменении тектонической обстановки в зоне подготовки сейсмического события.

О роли резонансных взаимодействий можно судить, проанализировав записи других цу-

Район	Время, UT	Координаты	Магнитуда	Глубина, км	Период вариаций, с	Амплитуда сигнала, нТл
Япония	11.09.2008 0:20:50,9	41,9° с. ш. 143,8° в. д.	6,8	33,0	150	1
Индонезия, о. Сулавеси	16.11.2008 17:02:31,8	1,32° с. ш. 122,1° в. д.	7,3	33	40	1
Индонезия	03.01.2009 19:43:53,0	0,45° ю. ш. 132,75° в. д.	7,6	33,0	63	1
Индонезия	03.01.2009 22:33:40,2	0,7° ю. ш. 133,3° в. д.	7,3	33,0	63	2,1
Курильские острова	15.01.2009 17:49:36,8	46,9° с. ш. 155,2° в. д.	7,4	33,0	126	2,1
Индонезия	11.02.2009 17:34:50,7	3,7° с. ш. 126,5° в. д.	7,2	33,0	158	3,4
Район островов Тонга	19.03.2009 18:17:38,8	23,2° ю. ш. 174,6° з. д.	7,6	33,0	95	2
Карибское море	28.05.2009 08:24:43,0	16,7° с. ш. 86,4° з. д.	7,3	10,0	158	1,2
Новая Зеландия	15.07.2009 09:22:31,8	45,7° ю. ш. 166,7° в. д.	7,8	33,0	110	3
Андаманские острова	10.08.2009 19:55:38,5	14,1° с. ш. 92,92° в. д.	7,5	33,0	126	1,1
Япония	10.08.2009 20:7:9,1	34,74° с. ш. 138,3° в. д.	6,4	33	126	2,9
Суматра	16.08.2009 7:38:21,7	1,479° ю. ш. 99,49° в. д.	6,7	50	150	2,9
Район о-вов Самоа	29.09.2009 17:48:11,0	15,4° ю. ш. 172,2° з. д.	8	20,0	150	2
Индонезия	30.09.2009 10:16:08,6	0,8° ю. ш. 99,9° в. д.	7,5	90,0	150	4
о-ва Вануату	07.10.2009 23:03:14,4	13,01° ю. ш. 166,5° в. д.	7,6	33	250	4

намигненных событий (рис. 8). Здесь аномальное геомагнитное возмущение, зафиксированное за час до начала этого землетрясения, отличается четким квазигармоническим сигналом.

Отмеченные выше геодинамические особенности наведенных геомагнитных возмущений

отчетливо проявились и во время цунамигненного землетрясения в районе Северной Суматры 06 апреля 2010 г., $M=7,8$, Индонезия (рис. 9). Аномальные геомагнитные УНЧ-возмущения появились здесь на записях за 22 ч перед землетрясением (см. рис. 8, вставка 2). При этом все

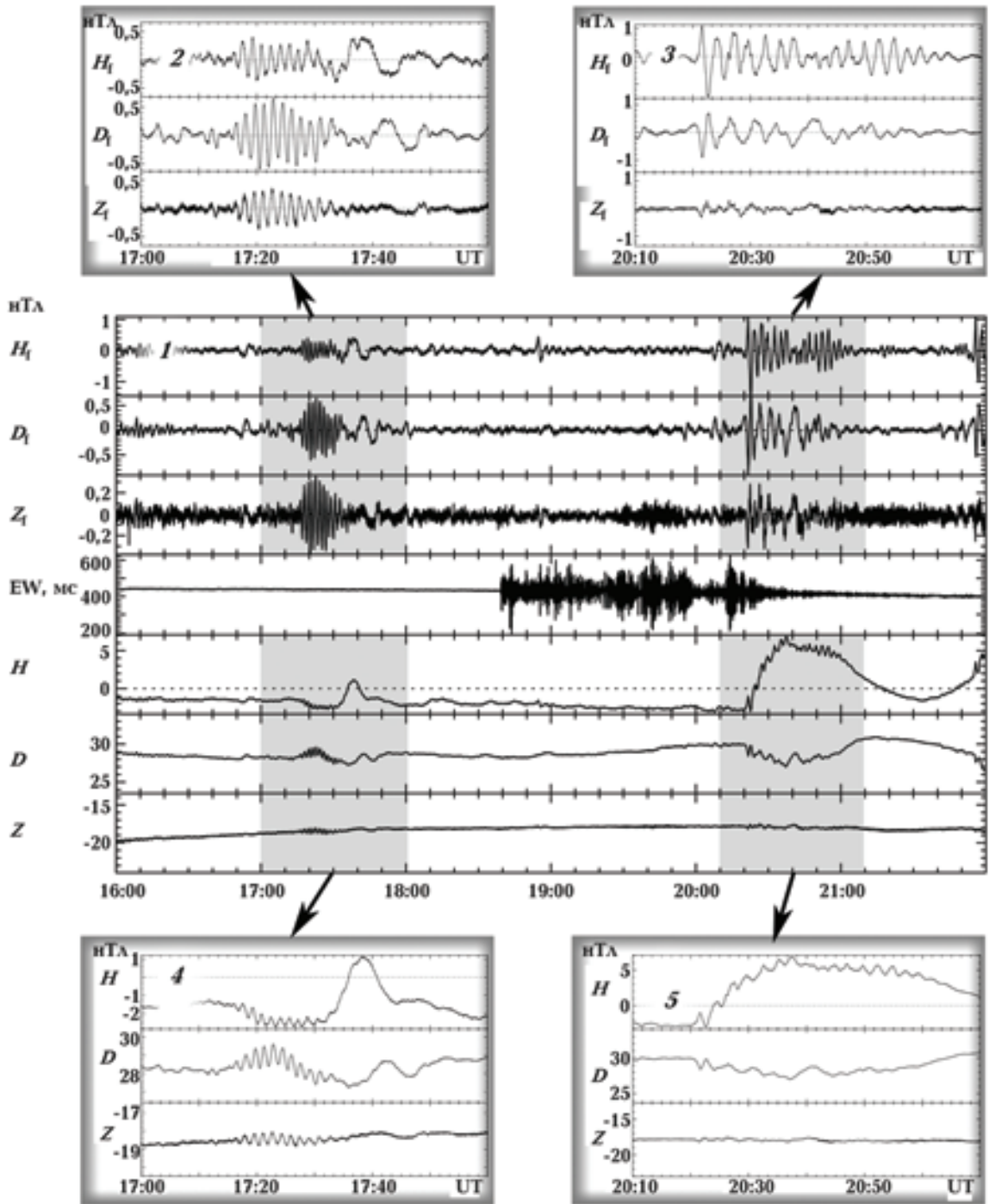


Рис. 8. Цунамигенное землетрясение, которое произошло 19.03.2009 в районе о-вов Тонга. Параметры: время в очаге: 18:17:38,8; магнитуда 7,6; глубина 33,0 км; широта 23,2°; долгота — 174,6°, по данным лаборатории № 1 Северокавказской геофизической обсерватории. Вставка 1 — регистрограммы магнитовариационной станции (H , D , Z) и показания наклономеров запад — восток (EW); вставка 2, 4 — волновые формы аномального ультранизкочастотного магнитного возмущения, проявившиеся за час до землетрясения; вставка 3, 5 — характерные волновые формы аномальных УНЧ квазигармонических магнитных возмущений, которые наблюдались на этапах подготовки и развития землетрясения; H_f , D_f , Z_f — вариации магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне 10—500 с. Остальные условные обозначения см. на рис. 6.

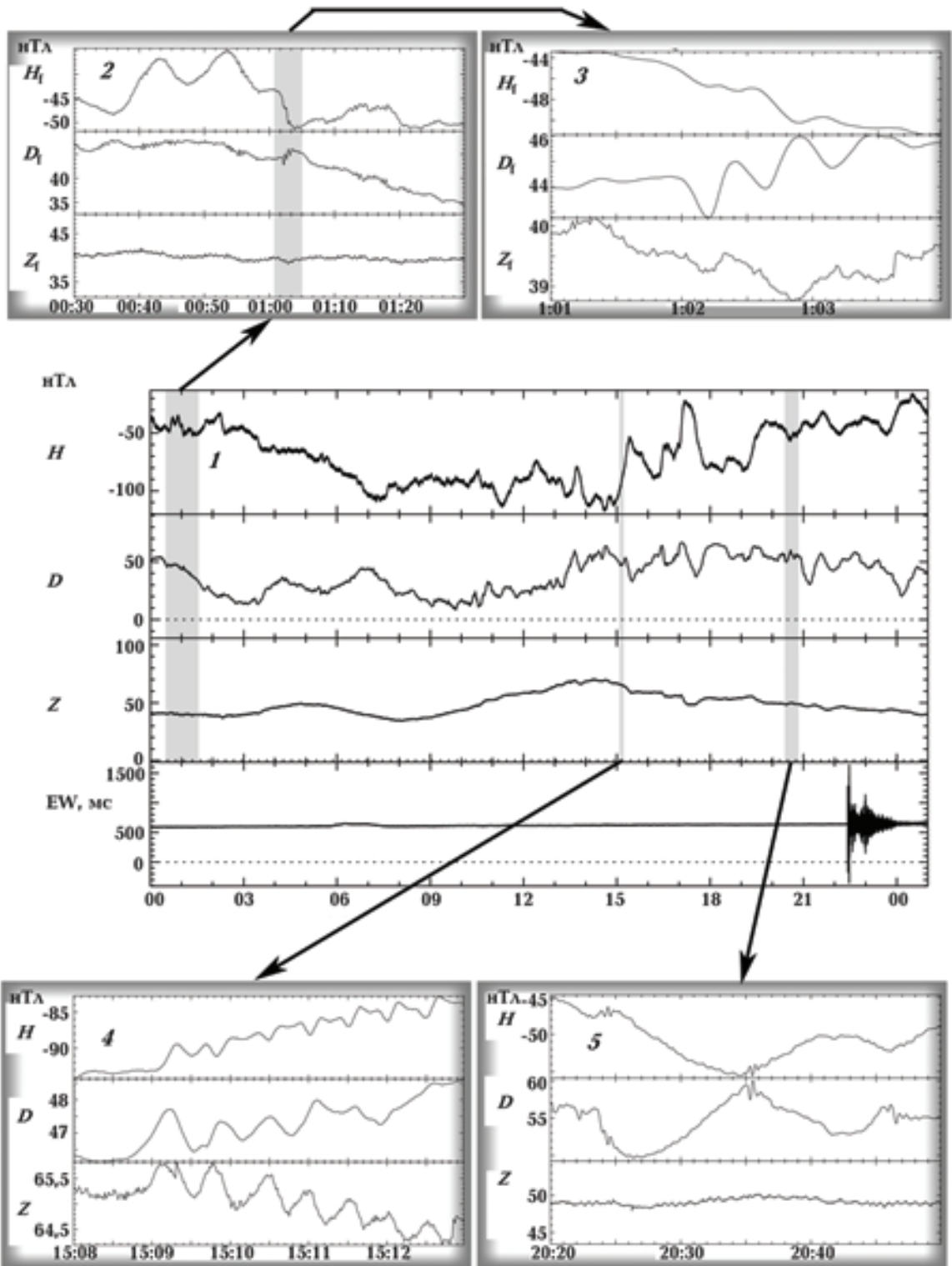


Рис. 9. Цунамигенное землетрясение в районе Северной Суматры 06 апреля 2010 г. Вставка 1 — регистрограммы показаний наклономера в направлении запад — восток и вариаций магнитного поля Земли, серым тоном отмечены характерные участки магнитограммы, где были выделены аномальные УНЧ геомагнитные возмущения; вставка 2 — волновые формы УНЧ геомагнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли за 22 ч до землетрясения; вставка 3 — то же в увеличенном масштабе; вставка 4 — волновые формы УНЧ геомагнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли за 7 ч в увеличенном масштабе; вставка 5 — волновые формы УНЧ геомагнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли и показания наклономеров непосредственно перед событием (за 1 ч); H_f , D_f , Z_f — вариации магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне 10—500 с. Остальные условные обозначения см. на рис. 6.

УНЧ-возмущения имеют выраженные квазигармонические составляющие. Длительности наблюдаемых сигналов и следующие друг за другом пакеты возмущений отражают спонтанную природу возникающих токовых систем, генерируемых наэлектризованными неустойчивыми дилатантными образованиями, реально существующими в разломно-блоковых отдельностях на всех этапах подготовки и развития сильного сейсмического события под океаническим дном.

Результаты расшифровки наблюдений УНЧ геомагнитных возмущений, предвещающих сильные цунамигенные события в районе Индонезии и других регионах Земли (см. табл. 2), дают основание полагать, что волновые формы регистрируемых УНЧ магнитных возмущений имеют характерные отличительные особенности и являются своеобразным "портретом" готовящегося цунамигенного землетрясения. Длительности регистрируемых возмущений, трансформация наблюдаемых волновых форм по мере приближения сейсмического удара и тонкая структура самого возмущения определяют спонтанную природу динамических взаимодействий в эпицентральной зоне и характерные особенности сопутствующих токовых систем, генерируемых на всех стадиях развития сейсмического процесса. Полученные представительные данные по УНЧ геомагнитным возмущениям могут быть использованы при изучении геолого-геофизических особенностей зоны подготовки сильных цунамигенных сейсмических событий.

Заключение. С начала 1970-х годов в специализированной научной литературе появляются регулярные научные сообщения о наблюдении аномальных явлений в атмосфере и ионосфере, а также в системе теллурических токов и в структуре УНЧ-вариаций электромагнитного поля перед крупными землетрясениями. Здесь, прежде всего, следует выделить работы: О. М. Барсукова, Я. М. Гогатишвили, М. Б. Гохберга, Ю. В. Копытенко, А. В. Кустова, В. Г. Кузнецова, В. А. Моргунова, В. А. Липеровского, В. А. Гладышева и других ученых из профильных институтов РАН; значительный вклад в решение затронутой проблемы вносят ученые Национальной академии наук Украины В. Г. Бахмутов, В. Е. Максимчук, Т. А. Мозговая, Ф. И. Седова, Г. Е. Харечко и другие.

Однако аномальные электромагнитные явления, предшествующие сейсмическим событиям разного масштаба и силы, до сих пор не получили всестороннего экспериментального подтверждения. Основная причина здесь кроется в отсутствии целенаправленной регистрации геомагнитных возмущений перед сейсмическими событиями с магнитудой более $M = 6 + 7$ различными типами специализированной геофизической аппаратуры. Это, в свою очередь, не только затрудняет получение представительной информации по аномальным структурам сейсмических и электромагнитных возмущений, но и не позволяет производить оперативный анализ тонкой структуры самих сигналов. Тем не менее последние достижения в данной области наук о Земле выглядят сегодня весьма обнадеживающими относительно дальнейших исследований связи литосферных, атмосферных и ионосферных процессов на этапе подготовки и развития, по крайней мере, крупных сейсмических событий, как на суше, так и в океане [Собисевич, 2010].

Работы, начатые в 1970-х годах, продолжают в настоящее время в лабораториях ИФЗ РАН, ИЗМИРАН, Институте геофизики НАН Украины и в других научных организациях. Поток новых данных, связанных с наблюдениями аномальных геофизических явлений, включая и экспериментальные результаты, полученные информационно-измерительными комплексами Северокавказской геофизической лаборатории ИФЗ РАН, в последние годы значительно возрос [Собисевич и др., 2008; Собисевич, 2010].

Сейсмоэлектромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов развития землетрясений и других катастрофических событий в геосферах Земли. Это следует принимать во внимание, поскольку электромагнитные возмущения распространяются на значительные расстояния от источника и легко детектируются [Surkov, Pilipenko, 1999]. Частотно-зависимое ослабление электромагнитных возмущений в проводящих геосферах Земли обуславливает три возможных диапазона наблюдений:

— ОНЧ (VLF)-излучения с частотами от сотен герц до первых мегагерц, источники которого могут находиться в поверхностных слоях земной коры и связаны с микрорастрес-

киванием породы в областях развития разломно-блоковых структур и дилатансных образований;

- УНЧ- и СНЧ (ULF) -возмущения с характерными частотами от миллигерц до герц, источники которых находятся, в том числе, в области очага готовящегося землетрясения. Они могут быть обусловлены нестационарным флуктуирующим движением поровой жидкости в дилатансных структурах с последующей генерацией мощных разрядов от накопившегося статического электричества между отдельными разломно-блоковыми образованиями дилатансного типа в готовящемся очаге [Fedorov et al., 2001; Алексеев и др., 2008; Николаевский, 2011].

Имеются обнадеживающие результаты, указывающие на появление аномальных квазигармонических волновых процессов за часы, десятки часов и дни до отдельных сейсмических событий [Piliipenko et al., 1999; Копытченко и др., 2000; Собисевич и др., 2009; Собисевич, 2010].

Зона подготовки сильного землетрясения может иметь характерные размеры порядка сотен и даже тысячи километров. Крупномасштабный характер наблюдаемых аномальных возмущений естественных полей Земли, вызванных подготовкой сейсмического события, помогает обнаружению аномальных волновых структур путем изучения геофизических процессов наземными геофизическими комплексами и дистанционными наблюдениями за состоянием ионосферы.

Ионосферу, по существу, можно представлять как тонкий слой легкоподвижной плазмы на удалении порядка 100 км от земной поверхности, чутко реагирующий на крупномасштабные приземные волновые возмущения даже небольшой амплитуды. Непосредственным агентом переноса возмущений на ионосферные высоты могут выступать квазистационарные электрические поля [Гохберг и др., 1985; Гошджанов и др., 1991] и акустико-гравитационные атмосферные волны (АГВ) с периодами более 5 мин [Piliipenko et al., 2001]. Характерная особенность АГВ — нарастание их амплитуды по мере рас-

пространения вверх в атмосферу с экспоненциально падающей плотностью.

Ионосферная плазма обладает собственной свободной энергией, поэтому даже сравнительно слабое внешнее воздействие может стимулировать каскад плазменных и электромагнитных процессов.

Обсуждение экспериментальных данных, полученных информационно-измерительными системами Северокавказской геофизической обсерватории, показало, что представительные результаты по аномальным геомагнитным возмущениям, наведенным развивающимися геодинамическими процессами в зоне подготовки сильных цунамигенных сейсмических событий (см. табл. 2), получены впервые.

Развитие научных исследований в рамках обозначенной здесь фундаментальной проблемы, с целью получения значимой прогностической информации, требует дальнейшего совершенствования аппаратной базы обсерватории и отдельных пунктов наблюдений, расположенных в авроральной зоне. Необходимо организовать многопараметрический мониторинг, включающий данные разнесенных магнитовариационных информационно-измерительных систем. Новые научные результаты по тонкой структуре УНЧ геомагнитных возмущений, наведенных сильными сейсмическими событиями под океанским дном, позволят расширить наши представления о подготовке цунамигенных катастроф.

Оперативная геофизическая информация по затронутой проблеме, получаемая в лабораториях Северокавказской геофизической обсерватории и других развернутых нами специализированных лабораториях, расположенных в авроральной зоне, регулярно публикуется в открытом доступе на Интернет-ресурсе: <http://forecast.izmiran.ru/>.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 гг. (государственный контракт № 16.518.11.7057 от 12 мая 2011 г.)" и Программы фундаментальных исследований № 4 Президиума РАН.

Список литературы

- Алексеев А. С., Глинский Б. М., Имомназаров Х. Х., Ковалевский В. В., Собисевич Л. Е., Хайретдинов С. М., Цибульчик Г. М. // Изменения природной среды и климата. Природные катастрофы. Ч. 1 / Под ред. акад. Н. П. Лаврова. — Москва: ИФЗ РАН, 2008. — 1. — С. 179—222.
- Барсуков О. М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. — 1991. — № 12. — С. 93—96.
- Бахмутов В. Г. Связь палеомагнитных изменений с вековыми вариациями геомагнитного поля // Доп. НАН України. — 2001. — 2. — С. 116—122.
- Бахмутов В. Г., Сегова Ф. И., Мозговая Т. А. Морфологические признаки в структуре геомагнитных вариаций накануне и в период подготовки сильнейшего землетрясения 1998 года в Антарктиде // Укр. антаркт. журн. — 2003. — № 1. — С. 54—60.
- Гогатишвили Я. М. Геомагнитные предвестники интенсивных землетрясений в спектре геомагнитных пульсаций с частотами 1—0, 02 Гц // Геомагнетизм и аэрономия. — 1984. — 24, № 14. — С. 697—700.
- Гошджанов М. Б., Муханов М. Б., Пилипенко В. Импульсные возмущения ионосферы, вызванные грозовой и сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия. — 1991. — 31, № 6. — С. 1064—1069.
- Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Гершензон Н. И., Пилипенко В. А. Эффекты электромагнитной природы при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1985. — № 1. — С. 72—87.
- Гульельми А. В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физических наук. — 2007. — 177, № 12. — С. 1250—1276.
- Гульельми А. В., Зотов О. Д. О геомагнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. — 2012. — № 1. — С. 1—4.
- Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Копытенко Е. А., Воронов П. М., Зайцев Д. Б. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений // Докл. РАН. — 2000. — 371, № 5. — С. 685—687.
- Липеровский В. А., Гладышев В. А., Шалимов С. С. Литосферно-ионосферные связи перед землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1991. — № 3. — С. 26—35.
- Моргунов В. А. Реальности прогноза землетрясений // Физика Земли. — 1999. — № 1. — С. 79—91.
- Николаевский В. Н. Экстремальные природные процессы и катастрофы // Экология урана, геоэкология, гляциология. — Москва: ИФЗ РАН, 2011. — 2. — С. 316—332.
- Сегова Ф. И., Мозговая Т. А., Бахмутов В. Г. 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.
- Собисевич Л. Е. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии. — Москва: Изд-во ИФЗ РАН, 2010. — 465 с.
- Собисевич А. Л., Григнев Д. Г., Собисевич Л. Е., Канониди К. Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмич. приборы. — 2008. — 44. — С. 12—25.
- Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Собисевич А. Л. Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями // Докл. РАН. — 2009. — 429, № 5. — С. 688—672.
- Сытинский А. Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью. — Ленинград: Гидрометиздат, 1987. — С. 99.
- Fedorov E. N., Pilipenko V. A., Vellonte M., Uyeda S. Electric and magnetic fields generated by electrokinetic processes in a conductive crust // Phys. Chemistry Earth. — 2001. — 26, № 10—12. — P. 793—799.

- Fraser-Smith A.C.* Ultralow-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes // *Eos.* — 2008. — **89**, № 23. — P. 211.
- Pilipenko V., Shalimov S., Fedorov E., Engebretson M., Hughes W.* Coupling between field-aligned current impulses and Pil noise bursts // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **1040**, № A8. — P. 7419—7430.
- Pilipenko V., Shalimov S., Uyeda S., Tanaka H.* Possible mechanism of the over-horizon reception of FM radio waves during earthquake preparation period // *Proc. Japan Acad. Sci.* — 2001. — **77B**, № 7. — P. 125—130.
- Surkov V., Pilipenko V.* The physics of pre-seismic electromagnetic ULF signals // *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes.* — Tokyo: TERRAPUB, 1999. — P. 357—370.