

УДК 537.86

ИЗМЕРЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА НА КАМЧАТКЕ: О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ТАКОГО ОПАСНОГО СОБЫТИЯ, КАК ЦУНАМИ

© 2020 г. С.В. Коробков, Ю.В. Шлюгаев, П.А. Микрюков,
М.Е. Гуцин, Е.А. Мареев

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,
г. Нижний Новгород, Россия*

Электромагнитные поля, индуцированные движением проводящей водной массы в постоянном магнитном поле Земли, применяются при измерении параметров течений и волн в океане и в принципе могут быть использованы при построении систем раннего оповещения о цунами. Независимо от конкретного технического решения, чувствительность и надежность электромагнитного регистратора цунами определяется фактическим уровнем естественного электромагнитного фона в диапазоне частот от 10^{-4} до 1 Гц. Представлены результаты исследования естественного электромагнитного фона в цунамиопасном районе России – на Камчатке. В регионе впервые проведены измерения переменных электромагнитных полей в частотном диапазоне, перекрывающем шесть порядков величины, с использованием современных широкополосных индукционных магнитометров. Измерения горизонтальных компонент переменных магнитных и электрических полей проводились в течение месяца при различных уровнях геомагнитной возмущенности. На основе полученных данных сформулированы качественные и количественные рекомендации по применению перспективных магнитометрических средств регистрации волн цунами в прибрежной зоне. Установлено, что уровень фонового шума на Камчатке либо сравним с ожидаемой амплитудой электромагнитных сигналов от волн цунами в придонной области, либо превышает ее. Поскольку электромагнитное поле, индуцированное волной цунами, локализовано вблизи фронта гидрофизического возмущения, а геомагнитные вариации, обусловленные ионосферными и магнитосферными процессами, носят крупномасштабный характер, для компенсации фона и увеличения отношения сигнал–шум при регистрации событий типа волн цунами предложено использовать дифференциальную обработку сигналов с пары пунктов, оснащенных идентичными комплектами векторных магнитометров.

Ключевые слова: магнитометр, магнитная гидродинамика, цунами, системы наблюдения.

Введение

В современных глобальных системах раннего оповещения о цунами используются как сети сейсмографов, установленных в разных точках Земли для фиксации землетрясений – источников цунами, так и сети донных датчиков давления *DART* [Mungov, Eblé, Bouchard, 2012; Bernard, Titov, 2015]. Сейсмические данные позволяют определить место землетрясения и его характеристики и сделать прогноз о том, способно ли оно генерировать цунами. Донные датчики давления системы *DART*, установленные на глубинах до 6000 м, позволяют регистрировать длиннопериодные возмущения давления и через спутниковую сеть *Iridium* передавать предупреждение об опасности в центры обработки данных. Прогнозы, сделанные на основе такой системы, достаточно хорошо согласуются с данными сети береговых датчиков уровня моря. В то же время, высокая

опасность цунами, а также дороговизна и сложность размещения глубоководного оборудования раннего обнаружения (например, станций системы *DART*) стимулируют поиск и развитие новых методов мониторинга и предупреждения об экстремальных океанских явлениях, в том числе – электромагнитных.

Магнитогидродинамические эффекты океанских волн и течений, обусловленные движением электропроводных масс воды в магнитном поле Земли, хорошо известны (см., например, [Larsen, 1971; Sanford, 1971]). Электромагнитные поля и токи, генерируемые в водной толще, могут служить источником информации о параметрах геофизических возмущений, а также для раннего оповещения о цунами. Сегодня данное направление активно развивается – подробную информацию по разработанным измерительным системам и моделям можно найти, например, в обзоре [Minami, 2017]. Развертывание в Тихоокеанском регионе сети донных станций, оснащенных электромагнитными датчиками [Toh, Goto, Hamano, 1998; Toh, Hamano, Ichiki, 2006], способствует проверке развитых теоретических представлений [Chave, 1983; Chave, Luther, 1990; Tyler, Mysak, 1995; Белоконь, Москвиченко, 1997, 1998]. Для регистрации волн цунами могут быть использованы электрические сигналы, наводимые в протяженных подводных кабельных трассах [Manoj et al., 2010]. Однако наиболее перспективными средствами регистрации волн цунами представляются современные компактные магнитометры, которые обладают высокой чувствительностью и обеспечивают проведение векторных измерений вариаций трех компонент магнитного поля Земли [Александров, 2010; Поляков и др., 2016]. Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку локальные векторные измерения переменного магнитного поля позволяют определить не только интенсивность волны цунами, но и направление ее движения [Minami, 2017]. В последнее десятилетие с помощью донных магнитометров получен уникальный натурный материал, позволяющий связать гидрофизические поля волн цунами с индуцированными в водной толще электромагнитными полями [Manoj, Maus, Chulliat, 2011; Toh et al., 2011; Suetsugu et al., 2012; Sugioka et al., 2014; Minami, Toh, Tyler, 2015; Schnepf et al., 2016]. Считается, что геомагнитные возмущения, связанные с прохождением волн цунами, могут быть зафиксированы и наземными (береговыми) магнитометрами [Tyler, Maus, Luhr, 2003]. Так, в работе [Kopytenko, Ismaguilov, Hayakawa, 2014] описан случай регистрации геомагнитных возмущений, связываемых с сильнейшим цунами после землетрясения Тохоку (11.02.2011 г., $M=9$), магнитометрами, установленными на существенном удалении от береговой линии. В связи с прогрессом в технике спутниковых измерений геомагнитных вариаций, обусловленных крупномасштабными океанскими течениями [Sabaka, Tyler, Olsen, 2016; Utada et al., 2011], нельзя полностью исключать возможность регистрации переменных магнитных полей волн цунами на борту низкоорбитальных космических аппаратов, например, за счет возбуждения интенсивных ионосферных токов [Сорокин, Яценко, Сурков, 2019].

Подводные измерения показывают, что переменное магнитное поле, индуцируемое волной цунами, имеет довольно высокую амплитуду – порядка 1 нТл – во всех трех компонентах вариации магнитного поля Земли [Manoj, Maus, Chulliat, 2011; Toh et al., 2011; Suetsugu et al., 2012; Sugioka et al., 2014; Minami, Toh, Tyler, 2015; Schnepf et al., 2016]. Характерные времена индуцированных волной цунами вариаций геомагнитного поля при наблюдении на стационарном пункте лежат в диапазоне от 5 до 60 мин, составляя в среднем около 20 мин. Волновая форма магнитного сигнала в отдельных компонентах воспроизводит временной ход вариации придонного давления вплоть до деталей [Suetsugu et al., 2012; Sugioka et al., 2014] и может быть представлена в аналитической форме [Minami, Toh, Tyler, 2015; Tyler, 2005]. Таким образом, магнитные измерения сами по себе достаточно информативны. Что касается задачи раннего

предупреждения о цунами, то для ее решения могут быть использованы некоторые особенности пространственной структуры и динамики индуцированного магнитного поля. Как на мелководье (в прибрежной зоне), так и на глубокой воде (в открытом океане) масштаб локализации магнитного поля оказывается несколько больше, чем масштаб гидрофизического возмущения. Поэтому в заданной точке магнитный сигнал может появляться на 5–15 мин раньше волны цунами [Minami, 2017].

Электромагнитные измерения дополняют массивы сейсмических и гидрофизических данных, используемых в научных и прикладных (прогностических) целях [Tyler, Oberhuber, Sanford, 1999]. Однако для дальнейшего развития электромагнитных методов мониторинга опасных океанских явлений и раннего оповещения о них необходимо решить ряд принципиальных проблем. Все они, в той или иной мере, сводятся к задаче выделения электромагнитных полей океанских волн из низкочастотного фона, образуемого естественными геомагнитными вариациями.

Первой проблемой является то, что индуцированное электромагнитное поле крупномасштабных океанских волн типа волн цунами представляет собой, по сути, ближнее поле индуцированных при движении волны токов. Электромагнитное поле, хотя и довольно велико в области самой волны цунами, но быстро спадает по мере удаления от нее. Это обстоятельство существенно ограничивает время упреждения при решении задач раннего оповещения о цунами. В работе [Toh et al., 2011] сопоставляются результаты измерений магнитных полей с помощью глубоководной донной станции и береговых геомагнитных обсерваторий. Уровень полей на дне составлял величину около 1 нТл и был достаточен для уверенной регистрации формы волны цунами в спокойных геомагнитных условиях. Однако береговые магнитные станции в тех же условиях не зарегистрировали сигнал цунами на фоне естественных геомагнитных полей.

Очевидный путь повышения чувствительности электромагнитной методики в данном случае – это использование двухпозиционной дифференциальной (или разностной) схемы измерений, в которой полезный сигнал формируется вычитанием сигналов с двух датчиков, находящихся на различных расстояниях от источника электромагнитного поля, например фронта волны цунами. Поскольку основной источник фоновых шумов предположительно находится в ионосфере и выше, т.е. не ближе 70–100 км от области измерений, то при использовании базы от единиц до первых десятков километров в прибрежной зоне и на шельфе возможна компенсация естественного ионосферного и магнитосферного фона и выделение полезных магнитных сигналов с соответствующим пространственным масштабом вариации.

Вторая проблема неотделима от первой и связана с тем, что фактические масштабы геофизических возмущений, порождаемых волной цунами, варьируют в чрезвычайно широких пределах. С одной стороны, фронт волны цунами при накате на берег имеет пространственный масштаб порядка 100–300 м. Соответствующие электромагнитные возмущения могут быть легко зарегистрированы дифференциальным методом на базе порядка 1 км, что фактически бесполезно для решения задачи раннего оповещения о цунами. С другой стороны, при движении волны цунами в открытом океане ее пространственный масштаб составляет от первых десятков до первых сотен километров. Соответствующие электромагнитные возмущения распределены в пространственной области, размеры которой сравнимы как с расстоянием до ионосферы, так и с масштабами ионосферных возмущений по горизонтали. В итоге, применение дифференциальной схемы на малой базе (~1 км) должно приводить к потере полезного сигнала от крупномасштабных электромагнитных источников в океане. На большой базе (~100 км) дифференциальная схема уже не позволяет в достаточной мере компенсировать естественный электромагнитный фон, особенно в высоких широтах.

В представляющем интерес диапазоне частот (от долей мГц до единиц Гц) современные магнитометры, включая квантовые [Александров, 2010] и индукционные [Поляков и др., 2016], имеют номинальную вариационную чувствительность менее 3 пТл. В натуральных измерениях при использовании дифференциальной схемы с компенсацией фона такими магнитометрами возможна регистрация сигналов уровня 10–100 пТл, что на один-два порядка меньше характерной величины магнитного поля, индуцированного волной цунами. Таким образом, принципиально возможна регистрация переменного магнитного поля в точках, сильно удаленных от гребня волны. Однако оптимальные варианты базы и состава электромагнитной измерительной системы, пригодной для решения задачи раннего предупреждения о цунами, могут быть выбраны только с учетом конкретной конфигурации дна и географии прибрежной зоны, а также фактических уровней, частотных спектров и временных форм геомагнитных возмущений в цунамиопасном районе.

В настоящее время в Институте прикладной физики РАН создается комплекс для исследования физических полей, связанных с развитием опасных природных и техногенных явлений в прибрежной зоне, включая волны цунами. В состав комплекса входят средства контроля параметров морского волнения, метеостанция, сейсмостанции, датчики постоянного электрического поля, средства векторных измерений низкочастотного электрического (электродные линии) и магнитного (индукционные магнитометры) полей. В представленной работе рассмотрено применение упомянутого комплекса при регистрации экстремальных волн по их электромагнитным полям в цунамиопасных районах на основе фактических характеристик естественного электромагнитного поля в частотном диапазоне геомагнитных пульсаций (10^{-4} –10 Гц) на восточном побережье п-ова Камчатка. Особый интерес представляет исследование вопроса о возможности построения системы предупреждения о цунами на основе береговой или донной магнитометрии. Сделана попытка обосновать параметры размещения магнитометров в прибрежной зоне в дифференциальной схеме измерений с учетом их фактической чувствительности и данных по электромагнитному фону, накопленных за август–сентябрь 2018 г.

Описание береговой измерительной системы

Для регистрации геофизических полей в прибрежной зоне цунамиопасного региона на Тихоокеанском побережье п-ова Камчатка был развернут комплекс средств электромагнитных и сейсмических измерений, дополняемых данными волнографа DWR-G (производитель *Datawell*) и метеостанции в г. Петропавловск-Камчатский¹. Измерения проводились с августа по сентябрь 2018 г. В качестве сейсмических приемников применялась пара регистраторов ZET 048-C (производитель *ZetLab*) с номинальным диапазоном рабочих частот 0.033–50 Гц. Хотя сейсмическая активность в регионе была типично высокой, предварительная обработка не выявила заметных волн цунами в период наблюдений. Поэтому полученные сейсмические данные в настоящей работе не обсуждаются.

Электромагнитные поля регистрировались в двух пунктах, первый из которых удален от береговой линии на расстояние 140 м, второй – на 1400 м. Позиции пунктов были выбраны по минимальному уровню помех на гармониках промышленной частоты (50 Гц). Измерения выполнялись в различных условиях по геомагнитной активности – в период наблюдений индекс K_p изменялся от 1 до 7. Использовались два идентичных

¹ [\(https://tp5.ru/Архив_погоды_в_Петропавловске-Камчатском_\(метеостанция\)\)](https://tp5.ru/Архив_погоды_в_Петропавловске-Камчатском_(метеостанция)) (дата обращения 30.09.2020).

комплекта оборудования, в каждый из которых для магнитных измерений входила пара ориентированных по сторонам света (север–юг, запад–восток) индукционных магнитометров IMS-008 (производитель ООО “ВЕГА”) [Поляков и др., 2016] и пара ортогональных электродных линий длиной 100 м для электрических измерений. Магнитометры, обеспечивающие векторные измерения горизонтальных компонент возмущений геомагнитного поля в диапазоне частот от $0.1 \cdot 10^{-3}$ до 400 Гц, были заглублены в грунт приблизительно на 30 см. Данные с магнитометров и электродных линий в каждом из пунктов оцифровывались с помощью АЦП ЛА-И 24USB (производитель ООО “Руднев-Шиляев”) с разрядностью 24 бит на частоте дискретизации 800 Гц, после чего записывались на жесткий диск персонального компьютера. Синхронизация записи в разных пунктах производилась один раз в сутки по сигналу GPS. Для обеспечения автономной работы и предупреждения влияния сетевых помех на результаты измерений в качестве источников питания всего оборудования приемных пунктов использовались аккумуляторы.

Для снижения уровня сигналов на гармониках промышленной частоты (50 Гц) временной ряд перед записью на жесткий диск персонального компьютера предварительно обрабатывался посредством цифровой фильтрации (ФНЧ с частотой среза 20 Гц) и понижения частоты дискретизации в 10 раз. Входной импеданс АЦП (1 МОм) на два порядка превышал активное сопротивление грунта между концами электродных линий (~ 10 кОм), поэтому горизонтальная компонента вектора напряженности электрического поля определялась как $E(t) = U_E(t)/L$, где $U(t)$ – временной ряд напряжения, фиксируемого на входе АЦП, $L = 100$ м – длина электродной линии, нагруженной непосредственно на вход АЦП. Горизонтальная компонента вектора индукции магнитного поля определялась с использованием коэффициентов преобразования магнитометра, ориентированного в соответствующем направлении: $k_1 = 0.8$ В·нТл $^{-1}$ ·Гц на частотах ниже 2 Гц, где коэффициент преобразования линейно зависит от частоты, и $k_2 = 1.6$ В·нТл $^{-1}$ на частотах выше 2 Гц, где коэффициент преобразования от частоты не зависит. На низких частотах сигнал индукционного магнитометра пропорционален производной от изменяющегося магнитного поля по времени – $U(t) \sim dB(t)/dt$ или $U_f \sim f B_f$ для периодических вариаций, где U_f и B_f – амплитуда колебаний напряжения и магнитного поля на частоте f , соответственно. Для восстановления волновой формы индукции медленных (низкочастотных) вариаций магнитного поля $B(t)$, представляющих для данной работы наибольший интерес, использовалась процедура численного интегрирования ряда напряжения $U_B(t)$ на входе АЦП с коэффициентом преобразования k_1 .

Для контроля получаемых медленных вариаций $B(t)$ использовались данные феррозондового магнитометра из сети INTERMAGNET¹, установленного в с. Паратунка (РЕТ, 59.971° с.ш., 158.248° в.д.) в 35 км от берегового измерительного пункта. Период дискретизации потока данных составлял 60 с, что соответствует частотам магнитных вариаций ниже 10 мГц.

Для спектральной обработки сигнала, в частности, для спектрального оценивания плотности его мощности, использовался метод Уэлча [Thomas, John, Abe, 2015], который основан на формировании псевдоансамбля спектров за счет разбиения получаемого временного ряда на сегменты, перекрывающиеся на 50 % по времени, с последующей обработкой каждого сегмента по процедуре быстрого преобразования Фурье. Применение этого метода из-за псевдоусреднения позволяет получать сглаженную оценку спектра мощности. Достоинством метода Уэлча при анализе широкополосных

¹ <http://www.intermagnet.org/data-donnee/dataplot-eng.php?type=xyz> (дата обращения 30.09.2020).

сигналов на длинных временных интервалах является слабая чувствительность обработки к импульсным помехам умеренной интенсивности, создаваемым, например, движением автотранспорта по ближайшим к зоне измерений дорогам.

Экспериментальные результаты

Временные зависимости медленных вариаций магнитного поля $B(t)$ на примере типичной шестичасовой записи показаны на рис. 1.

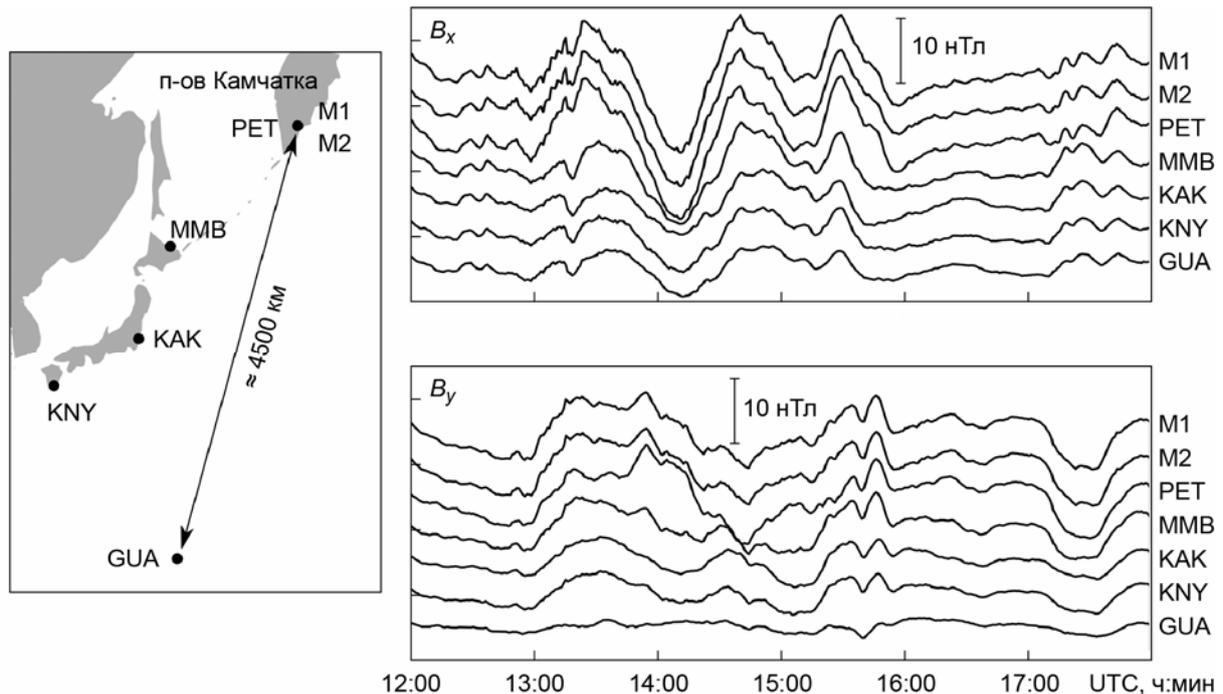


Рис. 1. Слева: схема расположения индукционных магнитометров M1, M2 на Камчатке и феррозондовых магнитометров сети INTERMAGNET – обсерваторий Паратунка (PET), Мемамбетцу (MMB), Какиока (КАК), Каноя (KNY), Гуам (GUA). Справа: типичная шестичасовая вариация горизонтальных компонент магнитного поля B_x (вверху), B_y (внизу), зарегистрированная 26.09.2018 г.; M1, M2 – записи индукционных магнитометров, остальные – записи регистраторов сети INTERMAGNET

Fig. 1. On the left: layout of M1, M2 induction magnetometers at Kamchatka and fluxgate magnetometers of INTERMAGNET network – Paratunka (PET), Memambetsu (MMB), Kakioka (KAK), Kanoya (KNY), Guam (GUA) observatories. On the right: typical six-hour variation of the horizontal components of the magnetic field B_x (above), B_y (below), recorded on 26.09.2018; M1, M2 – records of induction magnetometers, the rest – records of INTERMAGNET network recorders

Во-первых, необходимо отметить хорошую поляризационную избирательность векторных магнитометрических измерений: сигналы в компонентах B_x (север–юг) и B_y (запад–восток) заметно отличаются.

Во-вторых, форма вариации магнитного поля, полученная численным интегрированием сигнала индукционного магнитометра, согласуется с данными, зарегистрированными удаленным на 35 км феррозондовым магнитометром из пункта в с. Паратунка (PET). Повторяется как общая динамика геомагнитного поля, характеризующаяся получасовыми-часовыми вариациями, так и детали волновой формы с масштабами изменения

порядка одной минуты. Кроме того, данные, полученные на пунктах с индукционными магнитометрами М1 и М2, практически идентичны. Эти результаты подтверждают корректность выполненных измерений и использованных процедур обработки.

Уровень естественных вариаций магнитного поля не ниже, чем ожидаемая амплитуда магнитных полей, индуцируемых волнами цунами. В частности, можно выделить вариации от пятиминутных (с амплитудой порядка 1 нТл) до получасовых, имеющих амплитуды порядка 10 нТл. Данный диапазон амплитудно-временных характеристик перекрывает область параметров геомагнитных возмущений, ожидаемых при прохождении волн цунами. Регистрация волновой формы электромагнитного поля цунами в таких условиях возможна только при наличии других измерений (сейсмических, гидрологических), которые используются в качестве опорных, и только при применении корреляционного анализа в том или ином виде.

В широкой полосе частот анализ электромагнитного фона производился спектральными методами. Спектрограммы суточных вариаций геомагнитного поля в полосе частот f от 0.01 до 10 Гц за период с 27.08. по 08.09.2018 г. приведены на рис. 2.

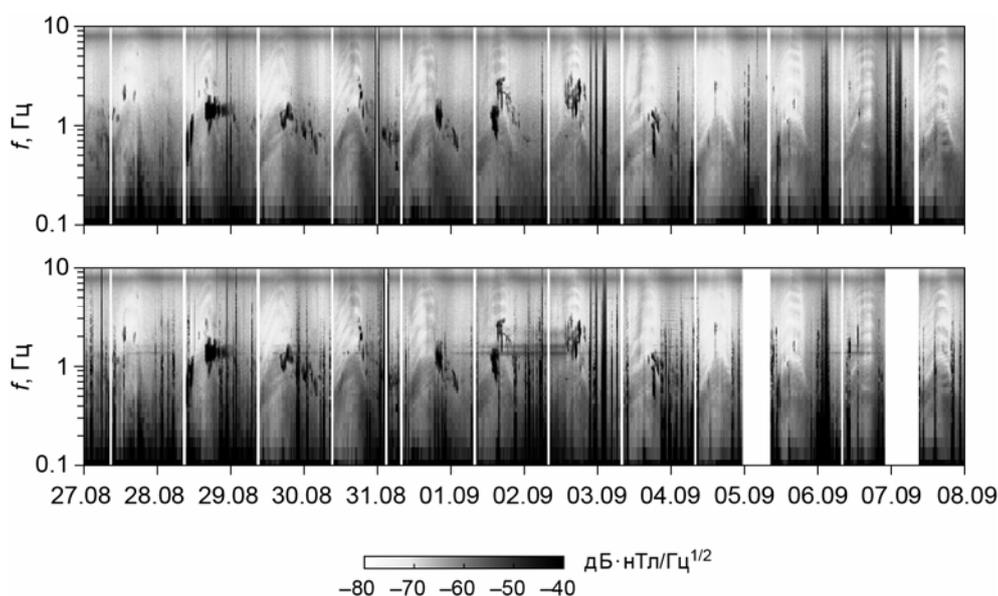


Рис. 2. Динамический спектр геомагнитных вариаций в горизонтальной компоненте магнитного поля B_x , фиксируемый в двух береговых пунктах – 140 м от моря (*вверху*), 1400 м от моря (*внизу*) с 27.08. по 08.09.2018 г.; по горизонтальной оси – дни месяца. *Снизу* – яркостная шкала логарифма спектральной плотности мощности геомагнитных вариаций

Fig. 2. The dynamic spectrum of geomagnetic variations in the horizontal component of the magnetic field B_x , recorded at two coastal points – 140 m from the sea (*above*), 1400 m from the sea (*below*) from 27.08. to 08.09.2018; on the horizontal axis – the days of the month. *From below* – the brightness scale of the logarithm of the spectral power density of geomagnetic variations

В названном диапазоне частот электромагнитный фон включает в себя несколько компонент, свойства которых, в целом, повторяются от одного дня к другому. Во-первых, в диапазоне частот 7–10 Гц выделяется серия Шумановских резонансов, частота и интенсивность которых мало меняются с течением времени. Амплитуда колебаний магнитного поля данной компоненты около 1 пТл. Во-вторых, уверенно регистрируются моды ионосферного альфвеновского резонатора, проявляющиеся в динамическом спектре как дискретные элементы с частотами, возрастающими от полуночи к полудню,

и убывающими во второй половине дня. Амплитуда соответствующих этим модам вариаций магнитного поля – около 0.3 пТл. В-третьих, в утреннем секторе и вблизи полудня регистрируются квазипериодические геомагнитные пульсации диапазона *Pc1* с частотой около 1 Гц и амплитудой, достигающей 100–300 пТл. Все эти компоненты естественного электромагнитного поля, в принципе, могут являться помехой при регистрации быстропеременных полей, связанных с движением коротких волн в океане, однако не создают препятствий для регистрации геомагнитных возмущений, индуцированных волнами цунами.

Частотные спектры геомагнитного поля в расширенной полосе частот от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10 Гц, построенные с часовыми интервалами по данным, полученным в период с 25.08. по 20.09.2018 г. в спокойных ($K_p=1$) и возмущенных ($K_p=6$) геомагнитных условиях, приводятся на рис. 3.

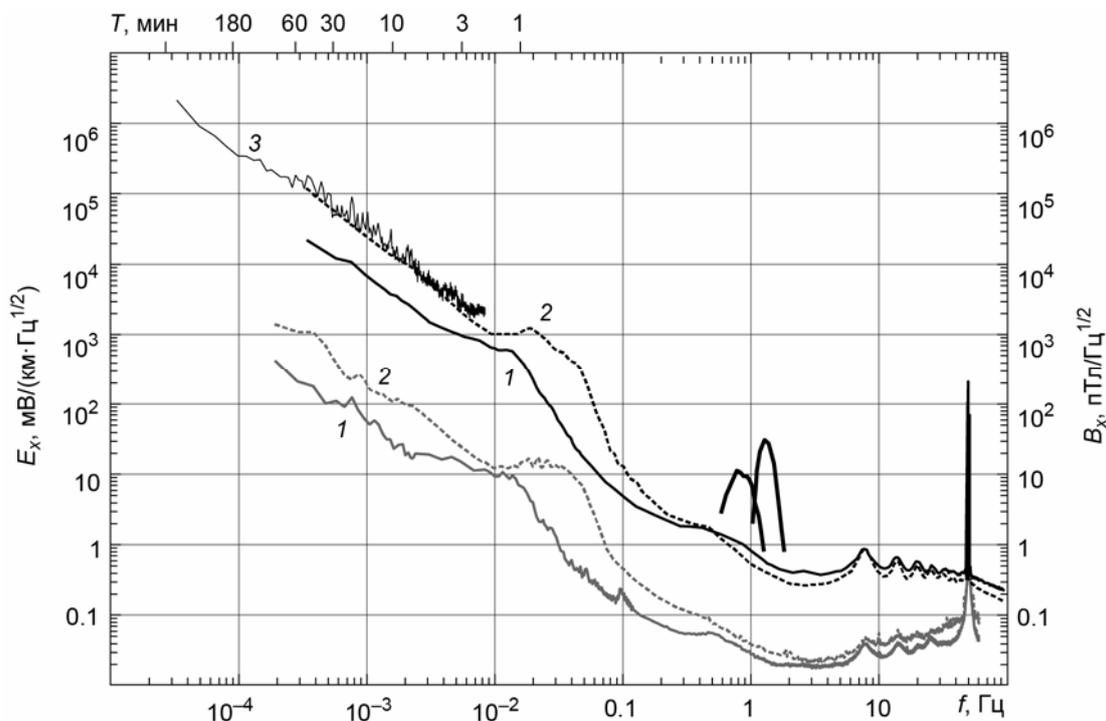


Рис. 3. Спектральная плотность амплитуды естественных электромагнитных полей, полученная в период с 25.08. по 20.09.2018 г. Выбраны дни с низким ($K_p=1$, 20.09.2018 г., кривая 1) и высоким ($K_p=6$, 11.09.2018 г., кривая 2) уровнем геомагнитной возмущенности. На частотах <1 мГц – спектр, построенный по данным станции PET ($K_p=1-3$, 26.08.–06.09.2018 г., кривая 3). Тонкие черные кривые – вариации магнитного поля B_x , серые кривые – вариации электрического поля E_x , толстые черные кривые – спектры короткопериодных пульсаций *Pc1*, зарегистрированные 28.08.2018 г., приведены для масштаба. Над верхней горизонтальной осью – периоды колебаний, соответствующих частотам под нижней осью

Fig. 3. Spectral density of the amplitude of natural electromagnetic fields, obtained in the period from 25.08 to 20.09.2018. Days with low ($K_p=1$, 20.09.2018, curve 1) and high ($K_p=6$, 11.09.2018, curve 2) levels of geomagnetic disturbance were selected. At frequencies <1 mHz – the spectrum constructed from the data of the PET station ($K_p=1-3$, 26.08.–06.09.2018, curve 3). The thin black curves – the variations of the magnetic field B_x , the gray curves – the variations of the electric field E_x , the thick black curves – the spectra of short-period pulsations *Pc1* recorded on 28.08.2018 are shown for the scale. Above the upper horizontal axis – periods of oscillations corresponding to frequencies below the lower axis

При построении спектра из временного ряда были исключены импульсные помехи, связанные с деятельностью людей (движением автомобилей, перемещениями техники, краткосрочными выключениями измерительной системы и т.д.).

Для восстановления спектра электрического поля использовались измерения, выполненные электродными линиями. Спектр переменного магнитного поля на частотах выше 1 мГц определялся по данным индукционных магнитометров; на меньших частотах для построения спектра были использованы данные феррозондового магнитометра, установленного в с. Паратунка. Данные, полученные магнитометрами обоих типов, удовлетворительно сшиваются в области частот от 1 до 10 мГц.

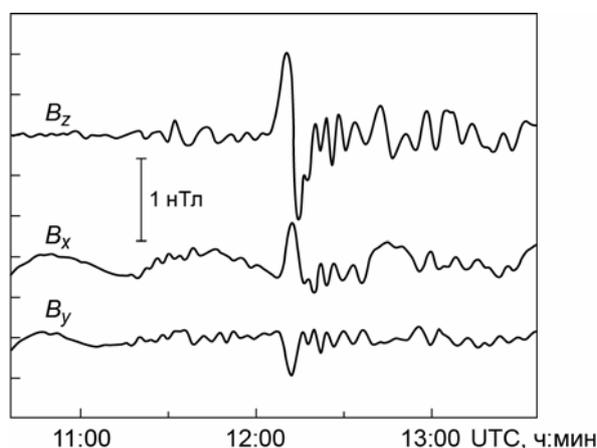
Длиннопериодные (низкочастотные) вариации геомагнитного поля характеризуются большей амплитудой, достигающей десятков-сотен нТл. В то же время, суточные геомагнитные вариации или вариации, связанные с приливами, не существенны для регистрации волн цунами, характеризующихся переходными электромагнитными процессами на масштабах не более одного часа. Таким образом, информативным следует считать диапазон частот выше 0.1 мГц, соответствующий геомагнитным вариациям с периодом T менее 3 ч. В этом интервале выделяется два характерных участка спектра. От 0.1 мГц (период порядка 3 ч) до 10 мГц (период порядка 2 мин) спектр носит степенной характер вида $B_f \sim f^\beta$, где показатель степени $\beta \sim 1.2$. В этом интервале спектральная плотность фонового магнитного сигнала изменяется от 1 нТл/Гц^{1/2} при $f \sim 10$ мГц до 100 нТл/Гц^{1/2} при $f \sim 0.1$ мГц. На частотах от 30 до 100 мГц в спектре наблюдается характерный излом, на котором спектральная плотность амплитуды магнитного поля падает почти в 100 раз, с 1.00 до 0.01 нТл/Гц^{1/2}. Именно эти данные могут быть взяты за основу при определении параметров перспективной электромагнитной системы регистрации волн цунами.

Обсуждение

Донные записи трех компонент переменного магнитного поля волны цунами, адаптированные из работы [Toh et al., 2011], приводятся на рис. 4. Сигналы представляют собой импульсы сложной формы, включающие пульсационную (с периодами от 5 до 20 мин) и бухтообразную (длительностью около 1 ч) компоненты с амплитудой порядка 1 нТл. Волна цунами – однократное, редкое событие, ее электромагнитный “портрет” представляет собой широкополосный сигнал, все спектральные составляющие которого одинаково важны для регистрации этого опасного явления. Нет оснований считать, что слабые сигналы от волн цунами могут быть выделены из фона за счет накопления или узкополосной фильтрации.

Рис. 4. Донная векторная запись переменного магнитного поля волны цунами 15.11.2006 г., адаптированная из [Toh et al., 2011]

Fig. 4. Bottom vector record of the alternating magnetic field of the tsunami wave on 15.11.2006, adapted from [Toh et al., 2011]



Для надежного обнаружения сигналов от волн цунами необходима модель, связывающая параметры сейсмического источника, гидрофизического и электромагнитного возмущений, а также набор эталонных сигналов или масок для корреляционного анализа. Однако важнейшим условием для применения такой модели на практике является превышение уровня импульсного геомагнитного возмущения, индуцированного волной цунами, над фоном. Между тем, при сопоставлении рис. 3, 4 видно, что ожидаемый уровень сигналов от волн цунами в информативной полосе частот от 0.1 до 10 мГц оказывается порядка или ниже уровня фона. Поэтому построение электромагнитной системы регистрации волн цунами, а тем более электромагнитной системы раннего оповещения о цунами, на основе изолированных, одноточечных измерений в рассматриваемом районе едва ли возможно.

Использование дифференциальной схемы измерений, позволяет компенсировать фоновые сигналы, источники которых находятся на расстоянии, превышающем длину измерительной базы. Ниже приводятся спектры естественного магнитного фона в диапазоне 0.1–10 мГц для различных уровней возмущенности (рис. 5, *вверху*) и спектры дифференциальных сигналов в тех же условиях, полученные для двух идентичных магнитометров IMS-008 с базой около 1 км (рис. 5, *внизу*).

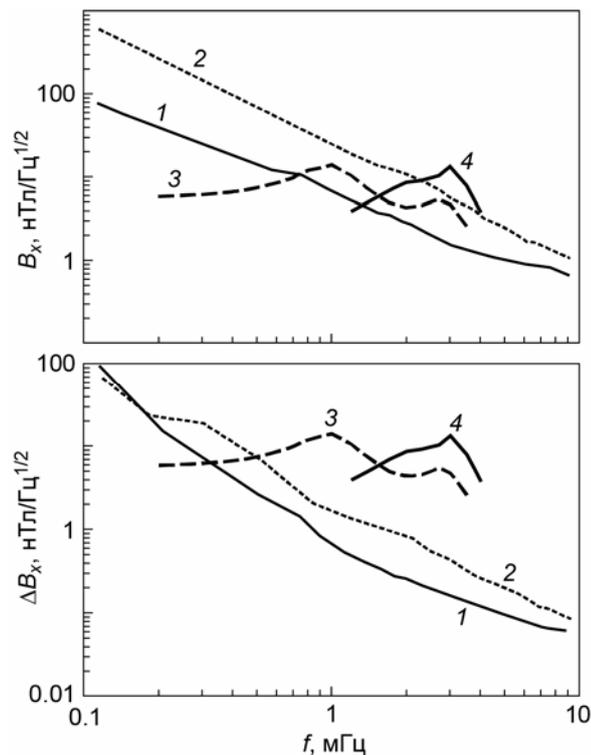


Рис. 5. Сравнение типичных уровней естественного геомагнитного фона (*вверху*), разностного сигнала между двумя магнитометрами, расположенными на расстоянии около 1 км друг от друга (*внизу*) при $K_p=1$ (кривая 1) и $K_p=6$ (кривая 2) и спектральной плотности мощности магнитного поля, ассоциированного с цунами 15.11.2006 (компонента B_x , кривая 3) и 13.01.2007 (компонента B_z , кривая 4) (по [Toh et al., 2011] с изменениями)

Fig. 5. Comparison of the typical levels of natural geomagnetic background (*above*), the difference signal between two magnetometers located at a distance of about 1 km from each other (*below*) at $K_p=1$ (curve 1) and $K_p=6$ (curve 2) and the spectral power density of the magnetic field associated with the tsunami on 15.11.2006 (B_x component, curve 3) and 13.01.2007 (B_z component, curve 4) (according to [Toh et al., 2011] with changes)

Частотные спектры электромагнитных возмущений от двух событий, сопровождавшихся возбуждением волн цунами, описанными в [Toh et al., 2011], также отображены на рис. 5 (кривые 3, 4). Можно видеть, что при одноточечных измерениях сигнал цунами оказывается на уровне фона. Однако поскольку амплитуда дифференциального сигнала в 20–30 раз ниже амплитуды исходных сигналов, то при надлежащем выборе базы выигрыш в чувствительности может достигать значений 25–30 дБ, и сигнал цунами уверенно регистрируется. Если считать приемлемым отношение амплитуд сигнал–шум порядка двух, то регистрируемая спектральная плотность амплитуды магнитного поля полезного сигнала должна составлять $1\text{--}3 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$, что соответствует типичным амплитудам магнитного поля волн цунами.

Отметим, что, согласно результатам моделирования, при движении волны цунами в придонной области должна возбуждаться интенсивная вертикальная (B_z) компонента магнитного поля, индукция которой достигает 5 нТл [Zhang et al., 2014]. В описанных в данной работе экспериментах вертикальная компонента вариаций магнитного поля систематически не изучалась. Очевидно, что в перспективных системах для регистрации возмущений магнитного поля от волн цунами необходимо предусматривать канал регистрации вариаций вертикальной компоненты. Следовательно, необходимы дополнительные исследования шумовой обстановки в вертикальной компоненте магнитного поля на берегу и в придонной области.

Важнейшим вопросом является выбор оптимального расстояния между приемными пунктами для реализации дифференциальной схемы. Близкое размещение датчиков (менее 1 км), конечно, позволяет компенсировать сигнал электромагнитного фона с достаточно высокой точностью (см. рис. 5), но при этом теряется и низкочастотная (длинноволновая) часть полезного сигнала. Разнесение датчиков на расстояния порядка 100 км нецелесообразно, поскольку не гарантирует должной компенсации фоновых вариаций магнитного поля, особенно в высокоширотных районах. Предварительно оптимальной можно считать базу ~30 км. Данный выбор базы может быть обоснован следующим образом.

База в несколько десятков километров оказывается порядка половины длины волны цунами при ее выходе на мелководье – на глубины порядка 200–500 м [Minami, 2017]. В этом случае можно реализовать два варианта регистрирующей системы: в первом предполагается размещение двух донных векторных магнитометров на разных расстояниях от берега, во втором используются также два магнитометра, но один из них донный, другой береговой. Если берег и дно сформированы из пород с близкими значениями проводимости σ , низкочастотный электромагнитный фон не должен иметь существенных отличий. Переменное фоновое магнитное поле с частотами f от 0.1 до 10 мГц проходит через соленую воду без ослабления и задержки – глубина скин-слоя в морской воде $\delta \sim 300/f^{1/2} > 3000$ м, что значительно превосходит глубину h в точке постановки магнитометра. При таком способе постановки магнитометров соотношение сигнал–шум с учетом фактических данных об электромагнитном фоне (см. рис. 5) соответствует режиму уверенной регистрации полезного сигнала.

В нашем случае сложно выполнить экспериментальную проверку возможности компенсации фоновых сигналов в дифференциальной схеме с базой порядка 30 км. Процедура вычитания сигналов индукционных магнитометров на берегу океана и удаленного на 35 км феррозондового магнитометра в с. Паратунка не является корректной как из-за отсутствия точной синхронизации по времени, так и из-за разных физических принципов их работы. Отметим, однако, что получаемые с помощью разных магнитометров сигналы близки по форме и амплитуде в обеих горизонтальных компонентах (см. рис. 1, справа). Поэтому при использовании идентичных, синхронизированных по времени магнитометров с данной базой можно ожидать получения дифференциального сигнала с качеством, достаточным для уверенной регистрации магнитного поля волны цунами.

Заключение

В период с августа по сентябрь 2018 г. в цунамиопасном районе – на п-ове Камчатка – проведены измерения уровня естественного электромагнитного фона в диапазоне частот от $5 \cdot 10^{-5}$ до 100 Гц. Данные измерений, выполненных индукционными магнитометрами и электродными линиями, согласуются с данными, полученными феррозондовыми магнитометрами сети INTERMAGNET. Для разных условий магнитной возмущенности в районе ($K_p=1-6$) установлено, что амплитуда полезного сигнала заметного цунами (~ 1 нТл) оказывается либо одного порядка с естественным уровнем фона в информативной полосе частот (0.1–10 мГц), либо ниже этого уровня. Поэтому построение электромагнитной системы регистрации цунами на основе односточечных векторных магнитометрических измерений нецелесообразно. Обеспечить надежную регистрацию электромагнитного поля волны цунами можно только при компенсации сигналов естественного фона, возможной при использовании дифференциальной схемы измерений. При надлежащем выборе базы (~ 30 км) и донной постановке основного (сигнального) векторного магнитометра такая схема может быть применена как для измерения гидрофизических параметров волны цунами, так и для раннего предупреждения о ней.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-80077 Опасные явления).

Литература

- Александров Е.Б.* Прогресс в квантовой магнитометрии для геомагнитных исследований // УФН. 2010. Т. 180, № 5. С.509–519.
- Белоконь В.И., Москвиченко Л.Г.* Приближенные методы оценки возмущений геомагнитного поля волны цунами // Физика Земли. 1997. № 10. С.92–93.
- Белоконь В.И., Москвиченко Л.Г.* О некоторых приближенных методах расчета возмущений геомагнитного поля крупномасштабными движениями океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. С.445–448.
- Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В.* Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 1. С.5–27.
- Сорокин В.М., Яценко А.К., Сурков В.В.* Генерация геомагнитных возмущений в ионосфере волной цунами // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 2. С.221–233.
- Bernard E., Titov V.* Evolution of tsunami warning systems and products // Philosophical Trans. Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. V. 373, N. 2053. P.20140371.
- Chave A.D.* On the theory of electromagnetic induction in the earth by ocean currents // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1983. V. 88, N B4. P.3531–3542.
- Chave A.D., Luther D.S.* Low-frequency, motionally induced electromagnetic fields in the ocean. 1. Theory // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N C5. P.7185–7200.
- Копытенко Ю.А., Исмагулов В.С., Hayakawa M.* Investigation of ULF magnetic field variations induced by tsunamis in a coastal zone // Proceeding of “Problems of Geocosmos”, St.-Petersburg. 2014. P.104–108.
- Larsen J.C.* The electromagnetic field of long and intermediate water waves // J. Mar. Res. 1971. V. 29, N 1. P.28–45.
- Manoj C., Kuvshinov A., Neetu S., Harinarayana T.* Can undersea voltage measurements detect tsunamis? // Earth, Planets and Space. 2010. V. 62. P.353–358.

- Manoj C., Maus S., Chulliat A.* Observation of magnetic fields generated by tsunamis // *Eos*. 2011. V. 92, N 2. P.13–14.
- Minami T.* Motional induction by tsunamis and ocean tides: 10 years of progress // *Surv. Geophys.* 2017. V. 38. P.1097–1132.
- Minami T., Toh H., Tyler R.H.* Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: Classification based on the ocean depth // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P.2171–2178.
- Mungov G., Eblé M., Bouchard R.* DART® Tsunameter retrospective and real-time data: A reflection on 10 years of processing in support of tsunami research and operations // *Pure and Applied Geophysics*. 2012. V. 170. P.1369–1384.
- Sabaka T.J., Tyler R.H., Olsen N.* Extracting ocean-generated tidal magnetic signals from Swarm data through satellite gradiometry // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P.3237–3245.
- Sanford T.B.* Motionally induced electric and magnetic fields in the sea // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76, Issue 15. P.3476–3492.
- Schnepf N.R., Manoj C., An C., Sugioka H., Toh H.* Time-frequency characteristics of tsunami magnetic signals from four Pacific Ocean events // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. V. 173. P.3935–3953.
- Suetsugu D., Shiobara H., Sugioka H., Ito A., Isse T., Kasaya T., Tada N., Baba K., Abe N., Hamano Y., Tarits P., Barriot J.-P., Reymond D.* TIARES Project – Tomographic investigation by seafloor array experiment for the Society hotspot // *Earth, Planets and Space*. 2012. V. 64. P.i–iv.
- Sugioka H., Hamano Y., Baba K., Kasaya T., Tada N., Suetsugu D.* Tsunami: Ocean dynamo generator // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. P.3596.
- Thomas B.E., John S.K., Abe S.* Power spectral density computation using modified Welch method // *International Journal of Science Technology and Engineering*. 2015. V. 2. P.145–152.
- Toh H., Goto T., Hamano Y.* A new seafloor electromagnetic station with an Overhauser magnetometer, a magnetotelluric variograph and an acoustic telemetry modem // *Earth, Planets and Space*. 1998. V. 50. P.895–903.
- Toh H., Hamano Y., Ichiki M.* Long-term seafloor geomagnetic station in the northwest Pacific: A possible candidate for a seafloor geomagnetic observatory // *Earth, Planets and Space*. 2006. V. 58. P.697–705.
- Toh H., Satake K., Hamano Y., Fujii Y., Goto T.* Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2011. V. 116. B02104.
- Tyler R.H.* A simple formula for estimating the magnetic fields generated by tsunami flow // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L09608.
- Tyler R.H., Maus S., Luhr H.* Satellite observations of magnetic fields due to ocean tidal flow // *Science*. 2003. V. 299, Issue 5604. P.239–241.
- Tyler R.H., Mysak L.A.* Motionally-induced electromagnetic fields generated by idealized ocean currents // *Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.* 1995. V. 80, Issue 3-4. P.167–204.
- Tyler R.H., Oberhuber J.M., Sanford T.B.* The potential for using ocean generated electromagnetic fields to remotely sense ocean variability // *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 1999. V. 24, Issue 4. P.429–432.
- Utada H., Shimizu H., Ogawa T., Maeda T., Furumura T., Yamamoto T., Yamazaki N., Yoshitake Y., Nagamachi S.* Geomagnetic field changes in response to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami // *Earth and Planetary Science Lett.* 2011. V. 311. P.11–27.
- Zhang L., Utada H., Shimizu H., Baba K., Maeda T.* Three-dimensional simulation of the electromagnetic fields induced by the 2011 Tohoku tsunami // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2014. V. 119. P.150–168.

Сведения об авторах

КОРОБКОВ Сергей Владимирович – младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук. 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46. Тел.: +7(831) 436-80-71. E-mail: korobkov@ipfran.ru

ШЛЮГАЕВ Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук. 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46. Тел.: +7(831) 416-48-02. E-mail: yshl@ipfran.ru

МИКРЮКОВ Пётр Андреевич – ведущий инженер, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук. 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46. Тел.: +7(831) 416-48-02. E-mail: peterm@ipfran.ru

ГУЩИН Михаил Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук. 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46. Тел.: +7(831) 436-80-71. E-mail: mguschin@ipfran.ru

МАРЕЕВ Евгений Анатольевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, руководитель отделения, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук. 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46. Тел.: +7 (831) 436-76-90. E-mail: mareev@ipfran.ru

MEASUREMENTS OF THE NATURAL ELECTROMAGNETIC BACKGROUND AT KAMCHATKA: ABOUT THE POSSIBILITY OF REGISTRATION OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES FROM SUCH A DANGEROUS EVENT AS TSUNAMI

S.V. Korobkov, Yu.V. Shlyugaev, P.A. Mikryukov,
M.E. Gushchin, E.A. Mareev

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Electromagnetic fields induced by the movement of a conductive water mass in the Earth's Permanent Magnetic Field (EPMF) are used to measure currents and waves in the ocean, and can in principle be used to build tsunami early warning systems. Regardless of the specific technical solution, the sensitivity and reliability of an electromagnetic tsunami recorder is determined by the actual level of natural electromagnetic background in the frequency range of $1 \cdot 10^{-4}$ to 1 Hz. This paper presents the results of the study of natural electromagnetic background in the tsunamigenic region of Russia – on the Kamchatka Peninsula. Using modern broadband induction magnetometers, for the first time in the region, measurements of alternating electromagnetic fields in a frequency range that cover six orders of magnitude have been performed. Measurements of horizontal components of alternating magnetic and electric fields were made during a month at different levels of geomagnetic disturbance. Based on the data obtained, qualitative and quantitative recommendations have been formulated for the application of advanced magnetometric tools for recording tsunami waves in the coastal zone. It was found that the level of background noise in Kamchatka is comparable to or exceeds the expected amplitude of electromagnetic signals from tsunami waves in the bottom region. Since the electromagnetic field induced by the tsunami wave is localized near the hydrophysical disturbance front, and the geomagnetic variations due to ionospheric and magnetospheric processes are large scale, differential signal processing from a pair of points containing identical sets of vector magnetometers has been proposed to compensate for the background and increase the signal-to-noise ratio when recording tsunami-wave events.

Keywords: magnetometer, magnetic hydrodynamics, tsunami, monitoring systems.

References

- Aleksandrov E.B., Advances in quantum magnetometry for geomagnetic research, *Phys. Usp.*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 487-496.
- Belokon' V.I., Moskvichenko L.G., Approximate methods for estimating geomagnetic field disturbances by tsunami wave, *Fizika Zemli* (Physics of Earth), 1997, no. 10, pp. 92-93. [in Russian].
- Belokon' V.I., Moskvichenko L.G., On some approximate methods for calculating geomagnetic field disturbances induced by large-scale oceanic motions, *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* (RAS Communications – Physics of Atmosphere and Ocean), 1998, vol. 34, pp. 445-448. [in Russian].
- Bernard E., Titov V., Evolution of tsunami warning systems and products, *Philosophical Trans. Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, vol. 373, no. 2053, pp. 20140371.
- Chave A.D., On the theory of electromagnetic induction in the earth by ocean currents, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1983, vol. 88, no. B4, pp. 3531-3542.
- Chave A.D., Luther D.S., Low-frequency, motionally induced electromagnetic fields in the ocean. 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 1990, vol. 95, no. C5, pp. 7185-7200.
- Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Hayakawa M. Investigation of ULF magnetic field variations induced by tsunami in a coastal zone, *Proceeding of "Problems of Geocosmos", St.-Petersburg*, 2014, pp. 104-108.
- Larsen J.C., The electromagnetic field of long and intermediate water waves, *J. Mar. Res.*, 1971, vol. 29, no. 1, pp. 28-45.
- Manoj C., Kuvshinov A., Neetu S., Harinarayana T., Can undersea voltage measurements detect tsunamis? *Earth, Planets and Space*, 2010, vol. 62, pp. 353-358.
- Manoj C., Maus S., Chulliat A., Observation of magnetic fields generated by tsunamis, *Eos*, 2011, vol. 92, no. 2, pp. 13-14.
- Minami T., Motional induction by tsunamis and ocean tides: 10 years of progress, *Surv. Geophys.*, 2017, vol. 38, pp. 1097-1132.
- Minami T., Toh H., Tyler R.H., Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: Classification based on the ocean depth, *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, pp. 2171-2178.
- Mungov G., Eblé M., Bouchard R., DART® Tsunamirometer retrospective and real-time data: A reflection on 10 years of processing in support of tsunami research and operation, *Pure and Applied Geophysics*, 2012, vol. 170, pp. 1369-1384.
- Poliakov S.V., Reznikov B.I., Shchennikov A.V., Kopytenko E.A., Samsonov B.V., The range of induction-coil magnetic field sensors for geophysical explorations, *Seismicheskiye Pribory* (Seismic Instruments), 2016, vol. 52, no. 1, pp. 5-27. [in Russian].
- Sabaka T.J., Tyler R.H., Olsen N., Extracting ocean-generated tidal magnetic signals from Swarm data through satellite gradiometry, *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, pp. 3237-3245.
- Sanford T.B., Motionally induced electric and magnetic fields in the sea, *J. Geophys. Res.*, 1971, vol. 76, issue 15, pp. 3476-3492.
- Schnepf N.R., Manoj C., An C., Sugioka H., Toh H., Time-frequency characteristics of tsunami magnetic signals from four Pacific Ocean events, *Pure and Applied Geophysics*, 2016, vol. 173, pp. 3935-3953.
- Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Surkov V.V., Generation of Geomagnetic Disturbances in the Ionosphere by a Tsunami Wave, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2019, vol. 59, issue 2, pp. 221-233.
- Suetsugu D., Shiobara H., Sugioka H., Ito A., Isse T., Kasaya T., Tada N., Baba K., Abe N., Hamano Y., Tarits P., Barriot J.-P., Reymond D., TIARES Project – Tomographic investigation by seafloor array experiment for the Society hotspot, *Earth, Planets and Space*, 2012, vol. 64, pp. i-iv.
- Sugioka H., Hamano Y., Baba K., Kasaya T., Tada N., Suetsugu D., Tsunami: Ocean dynamo generator, *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, pp. 3596.
- Thomas B.E., John S.K., Abe S., Power spectral density computation using modified Welch method, *International Journal of Science Technology and Engineering*, 2015, vol. 2, pp. 145-152.
- Toh H., Goto T., Hamano Y., A new seafloor electromagnetic station with an Overhauser magnetometer, a magnetotelluric variograph and an acoustic telemetry modem, *Earth, Planets and Space*, 1998, vol. 50, pp. 895-903.
- Toh H., Hamano Y., Ichiki M., Long-term seafloor geomagnetic station in the northwest Pacific: A possible candidate for a seafloor geomagnetic observatory, *Earth, Planets and Space*, 2006, vol. 58, pp. 697-705.
- Toh H., Satake K., Hamano Y., Fujii Y., Goto T., Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2011, vol. 116, B02104.

- Tyler R.H., A simple formula for estimating the magnetic fields generated by tsunami flow, *Geophys. Res. Lett.*, 2005, vol. 32, L09608.
- Tyler R.H., Maus S., Luhr H., Satellite observations of magnetic fields due to ocean tidal flow, *Science*, 2003, vol. 299, issue 5604, pp. 239-241.
- Tyler R.H., Mysak L.A., Motionally-induced electromagnetic fields generated by idealized ocean currents, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.*, 1995, vol. 80, issue 3-4, pp. 167-204.
- Tyler R.H., Oberhuber J.M., Sanford T.B., The potential for using ocean generated electromagnetic fields to remotely sense ocean variability, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 1999, vol. 24, issue 4, pp. 429-432.
- Utada H., Shimizu H., Ogawa T., Maeda T., Furumura T., Yamamoto T., Yamazaki N., Yoshitake Y., Nagamachi S., Geomagnetic field changes in response to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami, *Earth and Planetary Science Lett.*, 2011, vol. 311, pp. 11-27.
- Zhang L., Utada H., Shimizu H., Baba K., Maeda T., Three-dimensional simulation of the electromagnetic fields induced by the 2011 Tohoku tsunami, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2014, vol. 119, pp. 150-168.