

Аномальные геофизические и сеймотектонические процессы, наблюдавшиеся в период подготовки и развития землетрясения с магнитудой 8,8 в Мауле 2010 г. (Чили)

© Л. Е. Собисевич¹, В. И. Старостенко², Е. А. Рогожин¹, А. И. Лутиков^{1,3}, А. Л. Собисевич¹, К. Х. Канониди^{3,4}, А. В. Кендзера², М. И. Орлюк², 2016

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

²Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

³Единая геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

⁴Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва, Россия

Поступила 10 августа 2016 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Проанализовано вулканическую зону, головной удар, поштовки сильнейших афтершоков и ход вывільнення сейсмічної енергії протягом афтершокових процесів землетрусу Мауле 27.02.2010 р. ($M_W=8,8$) у Чилі. Розглянуто макросейсмічні прояви, тектонічну позицію вулкана і реконструкцію положення діючої у ньому площини. Вперше дано геофізичне трактування аномальних гравімагнітних збурень і сейсмічних провісників, наведених у варіаціях магнітного поля і геоакустичних полях Землі в період підготовки головного удару і трьох сильнейших повторних поштовків 11—16 березня 2010 р. Показано, що використання сучасних даних космічних спостережень дає змогу аналізувати гравітаційні збурення (поки тільки косейсмічні), що відбуваються на поверхні Землі, та по-новому розглядати провісники сейсмічних ударів землетрусу Мауле й інших сейсмічних подій. Сформульовано довго-, середньо- і короткострокові підходи до прогнозування сильних сейсмічних подій як на суші, так і в морі.

Ключові слова: сейсмічна активність, землетрус, вулканізм, флюїди, аномальні геофізичні, сейсмологічні та сеймотектонічні процеси, епіцентр, афтершоки, гравімагнітні збурення.

Введение. Западное побережье Чили относится к одному из наиболее активных в сейсмическом отношении районов Южной Америки. Именно здесь 22 мая 1960 г. произошло самое сильное в доступной сейсмической истории Земли цунамигенное сейсмическое событие. Землетрясение было инструментально зарегистрировано. Магнитуда составила 9,5, а колебания продолжались около 10 мин. В некоторых публикациях это землетрясение называют Вальдивским, так как эпицентр располагался возле г. Вальдивия ($38^{\circ}16'$ ю. ш., $73^{\circ}03'$ з. д.) примерно в 550 км южнее г. Сантьяго.

Сильные толчки потрясли громадную территорию, по площади превышающую 200 тыс. км². Было уничтожено более 20 % промышленного потенциала Чили. Сейсмическая катастрофа унесла жизни более 6000 чел., причем в основном погибли люди от удара цунами; более 3000 раненых, свыше 200 000 чел. остались бездомными. По некоторым данным высота волн цунами в отдельных местах побережья достигала 25 м.

Прокатившись через весь Тихий океан, гигантские волны обрушились и на Японию. Тысячи домов были смыты в море, затонули или были разбиты сотни судов, 120 чел. стали жертвами разгула водной стихии.

Высокая сейсмическая активность в регионе обусловлена его приуроченностью к зоне сочленения Наски и Южно-Американской тектонических плит. Республика Чили расположена в пределах Андского складчатого пояса. В северной и центральной частях Анды подразделяются на Главную и Береговую Кордильеры меридионального простирания и разделяющий их грабен Центральной Долины. В основании хребтов залегают в разной степени метаморфизованные породы осадочного и вулканического состава, протерозойского, палеозойского и мезозойско-палеогенового возрастов. В пределах обеих зон поднятий развита интенсивная складчатость, сформировавшаяся в разные эпохи (палеозойскую и альпийскую). Широко развиты мел-палеогеновые интрузии

гранитоидов (так называемый андийский батолит), а также неогеновые эффузивы кислого и среднего состава. Центральная депрессия заполнена молодыми осадочными отложениями. Земная кора под Андами — типично континентальная структура, мощность которой достигает 60 км.

С запада поднятие Анд обрамляется континентальным склоном Тихого океана и далее Перуанско-Чилийским желобом, тянущимся практически вдоль всего побережья Чили. К западу от желоба располагается океаническая литосферная плита Наска. Таким образом, активная континентальная окраина на побережье Чили представляет собой типичную зону субдукции на границе океанической и континентальной литосферных плит. Сейсмические процессы в зоне субдукции такого типа часто сопровождаются сильными цунамигенными землетрясениями.

В начале нынешнего столетия сильнейшие землетрясения были зарегистрированы в средней и северной частях побережья Чили (2010, 2014, 2015). Так, 27 февраля 2010 г. у берегов Чили произошло очередное катастрофическое цунамигенное землетрясение, названное Мауле, магнитудой 8,8 [Moreno et al., 2010; Melnick et al., 2012]. Землетрясение удалось спрогнозировать за два года до его возникновения учеными из исследовательских центров Германии и Чили на основании анализа геодезических данных, собранных плотной сетью GPS-приемников, размещенных в центральной части страны [Moreno et al., 2008, 2010].

Авторами настоящей статьи собраны и проанализированы представительные литературные материалы, дополненные новыми инструментальными данными о гравимагнитных возмущениях и поверхностных гравитационных проявлениях, характере движения в ходе афтершокового процесса больших гравитирующих объемов геологической среды в районе очаговой зоны.

Следует заметить, что изучение гравимагнетизма применительно к проблеме подготовки и развития сейсмической катастрофы становится определяющим в науках о Земле, когда исследователь обращается к изучению крупных сейсмических событий. Любое фиксируемое магнитное возмущение в вариациях магнитного поля Земли связано с движением больших масс геологической среды, и поэтому его следует трактовать как гравимагнитное. В частности, в областях субдукции происходит заталкивание и погружение океанической

высокомагнитной коры под континентальную плиту. Термомеханические и флюидогазовые процессы в таких областях литосферы могут приводить как к вековым изменениям геомагнитного поля (за счет перемещения и прогрева магнитного источника) на стадии подготовки землетрясения, так и к продуцированию аномалий ультранизкочастотного диапазона непосредственно перед и во время развития его очага [Орлюк, Пашкевич, 2012; Орлюк и др., 2016].

Инструментальное наблюдение гравитационных волн в эксперименте (14 сентября 2015 г. в 09:50:45 UTC), в котором были задействованы лазерные интерферометры гравитационно-волновой обсерватории (LIGO), заставляют переосмыслить подходы к объяснению трансформации гравитирующих геологических отдельных и пересмотреть существующие представления о развитии сейсмогравитационных процессов, имеющих место в литосфере и атмосфере. Сегодня геофизики должны оценить роль и значение гравитационных движений больших масс геологической среды в очаговых зонах землетрясений. Есть все основания полагать, что именно в этой области литосферы рождаются выделенные инструментальными методами гравимагнитные возмущения УНЧ диапазона, которые отражают процессы формирования крупных сейсмических событий [Собисевич и др., 2009; Собисевич, 2012; Николаевский, Собисевич, 2015].

Параметры очага и сейсмологические проявления землетрясения Мауле. Инструментальный эпицентр главного толчка по данным Геологической службы США (NEIC, neis.cr.usgs.gov) располагался в прибрежной зоне материкового склона Тихого океана (координаты $\varphi=35,846^{\circ}\text{S}$; $\lambda=72,719^{\circ}\text{W}$) приблизительно в 430 км к северо-северо-востоку от инструментального эпицентра Большого Чилийского землетрясения 22 мая 1960 г., $M_W=9,5$, и в 150 км к северу от Концепсьон (примерно в 350 км к юго-западу от г. Сантьяго).

Гипоцентр определен на глубине около 35 км, интенсивность сотрясений на берегу Чили составила в зоне, близкой к эпицентру, 8 баллов по Модифицированной шкале Меркалли, а семибалльные сотрясения охватили всю центральную часть Чили от 37° до 40° ю.ш. Не устояли даже сейсмостойкие здания (рис. 1). Через 20 мин после главного удара морские волны цунами высотой более 2—3 м обрушились на побережье.

Распределение эпицентров афтершоков первых пяти дней землетрясения 27.02.2010 г.,



Рис. 1. Разрушенное сейсмостойкое здание в г. Консепсьон.

по состоянию на 6 апреля 2010 г. по данным NEIC показало (рис. 2), что длина очаговой области, вытянутой в близмеридиональном направлении, составило около 600 км при ширине около 250 км. Глубина гипоцентров главного и всех повторных толчков составляла от 30 до 40 км, т. е. не выходила за пределы земной коры.

Решение фокального механизма очага по данным Геологической службы США показы-

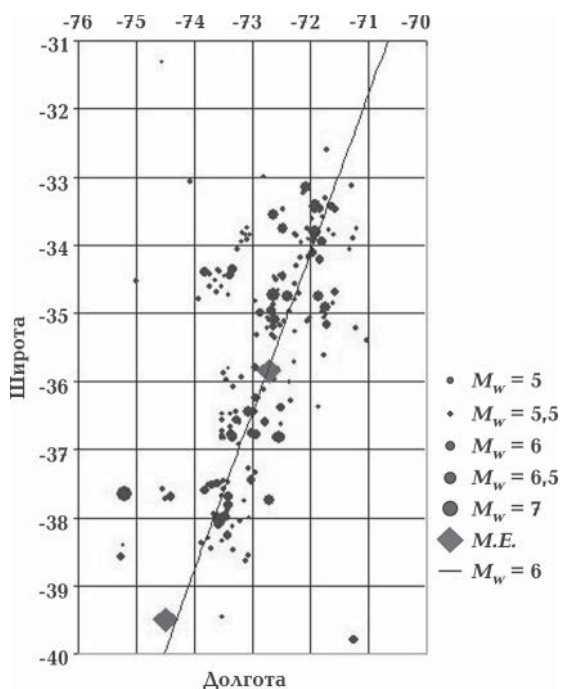


Рис. 2. Афтершоки первых пяти суток землетрясения 27.02.2010 г. по данным NEIC. Прямой показана линия ортогональной регрессии. Большими ромбами обозначены инструментальные эпицентры Большого Чилийского землетрясения 22 мая 1960 г. и 27 февраля 2010 г. Размер кружков, которыми обозначены афтершоки, пропорционален их магнитуде.

вает две альтернативные нодальные плоскости (рис. 3). Одна из них — близмеридионального простирания (СЗЗ 18°), полого погружающаяся к востоку-юго-востоку (под углом около 15°), а вторая, также близмеридиональная (азимут простирания около 180°), круто, под углом около 75°, падающая в сторону океана. При этом установлено, что глубины гипоцентров афтершоков не выходят за пределы 40 км. Тем самым можно сделать уверенный выбор в пользу первой нодальной плоскости и, соответственно, пологопадающего очага $dip=18$ под континент.

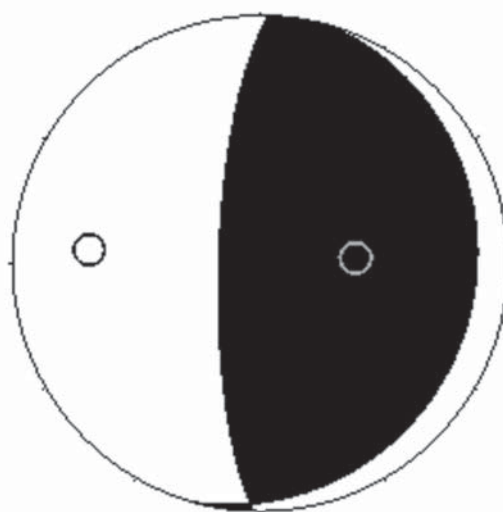


Рис. 3. Стереограмма решения фокального механизма очага землетрясения Мауле по данным Геологической службы США (<http://www.globalcmt.org>).

Таким образом, тип движения в очаге — надвиг с небольшой компонентой правостороннего сдвига. В геодинамическом отношении такое решение для очага свидетельствует о надвигании континентальной плиты на океаническую, а сам очаг может быть отнесен к разряду межплитных по классификации японских сейсмологов [Kikuchi, Kanamori, 1994].

Поскольку глубина очага составляла 30—40 км, а положение действующей плоскости было весьма пологим, по-видимому, он не вышел на поверхность дна в виде уступа в зоне сейсморазрыва. Этим и объясняется сравнительно небольшая высота волн цунами, порожденных землетрясением Мауле при высокой магнитуде самого события.

Геофизической службой РАН зарегистрировано семь афтершоков с $M \geq 6$ в течение первых нескольких часов после основного толчка, а на карте, составленной Геологической служ-

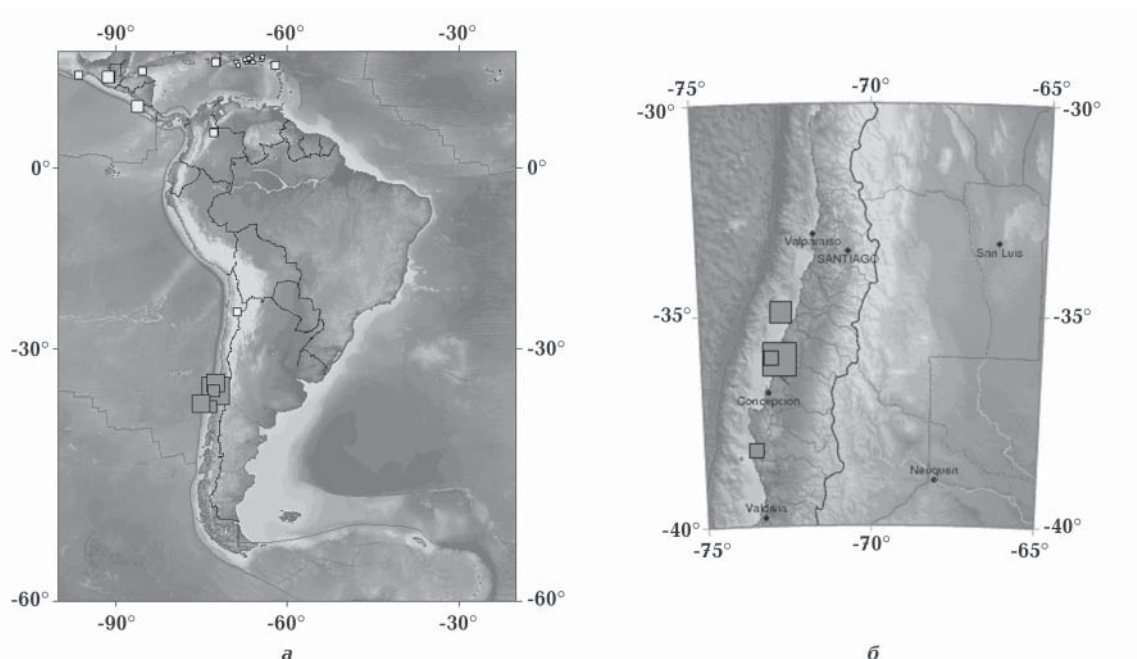


Рис. 4. Эпицентры главного толчка и афтершоков первых двух часов после землетрясения Мауле по данным Геологической службы США (а — в масштабе всей Южной Америки, б — в масштабе Центрального Чили). Размер квадрата определяется магнитудой.

бой США, показаны эпицентры толчков в течение первых двух часов после землетрясения Мауле (рис. 4).

Афтершоковый процесс анализируемого землетрясения на начальной стадии развивался достаточно вяло для сейсмического события такой силы. За первые 26 сут произошло около 350 афтершоков с магнитудами $4,5 \leq M_W \leq 6,9$. Анализ временного хода высвобождения M_{0cum} в первые сутки после землетрясения 27 февраля, позволил сделать вывод о возможности возникновения новых сильных повторных толчков с моментными магнитудами до 7,0—7,5.

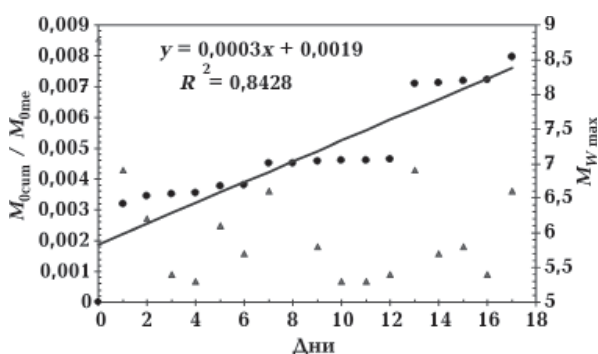


Рис. 5. Линейная аппроксимация высвобождения M_{0cum} в первые недели афтершокового процесса. Черные точки — величина M_{0cum} , треугольники — время и магнитуды повторных толчков.

Таким образом, серия трех достаточно сильных афтершоков 11—16 марта 2010 г. с магнитудами $M_W=7,2$; 6,8 и 6,6 спрогнозирована в режиме реального времени. Начальная стадия афтершокового процесса представлена на рис. 5.

В настоящее время афтершоковый процесс

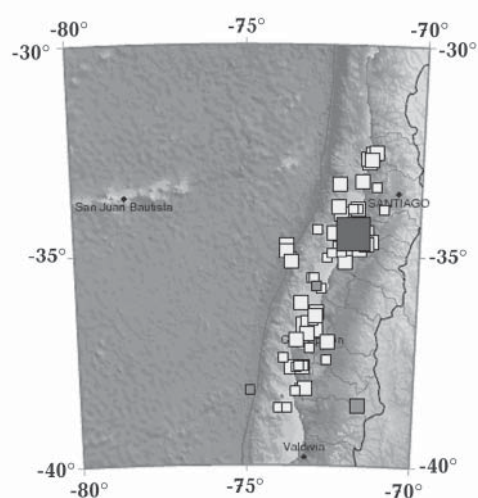


Рис. 6. Эпицентры повторных толчков землетрясения Мауле. Квадратом обозначен сильнейший афтершок 11 марта 2010 г. с $M=7,2$ по данным Геологической службы США.

землетрясения 27.02.2010 г. можно считать практически завершенным. Отметим также, что афтершоковая область землетрясения Мауле 2010 г. с юга пересекается с афтершоковой областью Большого Чилийского землетрясения 1960 г., а с севера — с афтершоковой областью сильного землетрясения на севере Центрального Чили 16.09.2015 г. ($M_W=8,2$), что может указывать на определенную связь между ними.

С 17 марта 2010 г. в афтершоковом процессе сформировалась новая фаза сейсмического затишья, так что дефицит в высвобождении M_{0cum} на 26.03.2010 г. составил $5,3 \cdot 10^{19}$ Н·м, что эквивалентно возникновению землетрясения с $M_W=7,1$ (рис. 4—6). Вероятно, этот дефицит послужил началом накопления напряжений в земной коре, вызвавших сильные землетрясения 2014 и 2015 гг.

Сейсмическая история. Рассмотрение сейсмической истории региона представляет несомненный интерес. Анализируемая область объединяет очаговые зоны землетрясений 22 мая 1960 г. ($M_W=9,5$) и 27 февраля 2010 г. ($M_W=8,8$), т. е. $48-31^\circ$ S, $76-69^\circ$ W. Информационной основой в период до 1960 г. послужил Латиноамериканский каталог, содержащийся на сайте NEIC (neic.cr.usgs.gov), а в период с 1961 по 2010 гг. — каталоги SYSRA и CMT (с 1976 г.) (<http://www.globalcmt.org/>). Первые сейсмические проявления в данном регионе относятся к 1570 г. Их фиксация связана с началом освоения этих территорий испанцами в процессе конквисты. Первоначально (до середины XVIII ст.) в каталоге содержались лишь сильнейшие события с магнитудами более 8. Разумеется, их магнитудная оценка является позднейшей реконструкцией, выполненной по описаниям, содержащимся, преимущественно, в монастырских хрониках. Так что для землетрясений доинструментального периода всегда имеем дело с макросейсмической магнитудой. С учетом того, что макросейсмическая магнитуда и магнитуда по поверхностным волнам (M_S) близки между собой, всем землетрясениям доинструментального и раннеинструментального периодов в каталоге SYSRA была приписана магнитуда M_S .

При переходе от магнитуд M_S и m_b , содержащихся в каталоге SYSRA, к моментной магнитуде и, соответственно, скалярному сейсмическому моменту применялись региональные корреляционные зависимости магнитуды M_W от магнитуд M_S и m_b , построенные соответственно по 142 ($R_c=0,922$) и 189 ($R_c=0,803$) парам сейсмических событий:

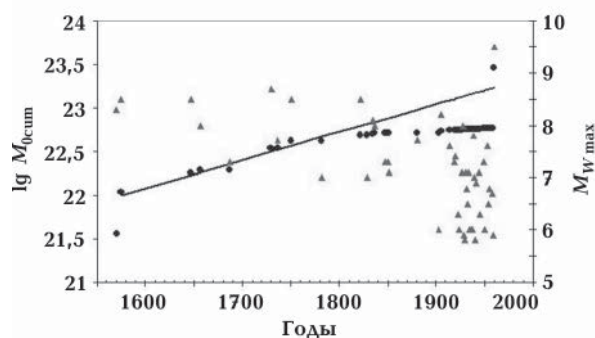


Рис. 7. Временная зависимость кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента в период с 1570 по 1960 гг. Треугольниками показаны сильнейшие на каждом шаге дискретизации сейсмические события (правая ось ординат).

$$M_W = (0,829 \pm 0,029)M_S + 1,178 \pm 0,195,$$

$$4,4 < M_S < 7,2, R_c = 0,922,$$

$$M_W = (1,202 \pm 0,067)m_b - 0,909 \pm 0,408,$$

$$4,7 < m_b < 6,8, R_c = 0,803.$$

На рис. 7 представлена временная зависимость кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента в период с 1570 по 1960 гг. Зависимость построена по 101 сейсмическому событию (интервал магнитуд $5,0 \leq M_S \leq 9,5$). Период 1575—1850 гг. аппроксимирован линейной зависимостью ($R_c=0,977$). Весьма высокий коэффициент линейной корреляции указывает на достаточную надежность полученного результата.

Из рисунка видно, что заметные отклонения от линейного закона высвобождения M_{0cum} начались с 1782 г. Приблизительно с этого времени накапливался дефицит в высвобождении M_{0cum} . Период времени с 1940 по май 1960 г. можно рассматривать как выраженную фазу сейсмического затишья перед Большим Чилийским землетрясением (БЧЗ) 22 мая 1960 г. [Kanamori, Sipar, 1974]. Дефицит в высвобождении M_{0cum} на май 1960 г. составил $\Delta M_{0cum} \approx 1,12 \cdot 10^{23}$ Н·м, что соответствует землетрясению с $M_W=9,3$. В действительности землетрясение 22 мая 1960 г. имело $M_W=9,5$, а его M_0 оценивался в $2,24 \cdot 10^{23}$ Н·м. Таким образом, прогнозируемый скалярный сейсмический момент землетрясения 22 мая 1960 г. оказался лишь в 2 раза меньше, что лежит в пределах точности сейсмологических данных.

Предвестники главного толчка. В ходе сейсмологических наблюдений за текущей сейсмичностью очаговая зона все последние

годы характеризовалась пониженным уровнем активности, будучи областью затишья.

Временной ход высвобождения кумулятивного сейсмического момента в регионе (M_{0cum})

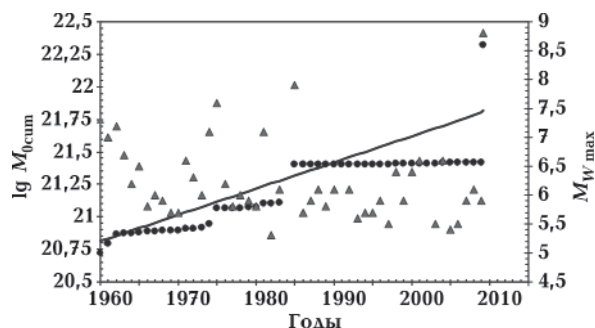


Рис. 8. Высвобождение кумулятивного сейсмического момента M_{0cum} в период с 1960 г. (от начала афтершокового процесса Великого Чилийского—Вальдивского землетрясения) по 27.02.2010 г. Прямая линия аппроксимирует линейную фазу высвобождения M_{0cum} в период с 1960 по 1997 г. ($R_c=0,958$). Черные точки — величина $lg M_{0cum}$, треугольники — время и магнитуды сильных толчков.

в период с 1960 по 2010 г., прослеженный на основании анализа данных сейсмических каталогов SYSRA (neic.cr.usgs.gov) и CMT ([http://](http://www.globalcmt.org/)

www.globalcmt.org/), выявил выраженную фазу сейсмического затишья, наблюдавшуюся в период начиная с 1986 до начала 2010 г. (см. рис. 8). Фактический дефицит в высвобождении M_{0cum} составил на начало 2010 г. $3,73 \cdot 10^{21}$ Н·м, что приблизительно в 5 раз меньше сейсмического момента землетрясения 27.02.2010 г.

На возможность возникновения нового сильного землетрясения в этой области указывало и аномально низкое значение индекса упорядоченности, наблюдавшееся в конце 2001 г., с последующим его почти монотонным ростом вплоть до землетрясения 27.02.2010 г. [Лутиков, 2008, 2010; Собисевич и др., 2012].

Однако период продолжительностью приблизительно в 50 лет между землетрясениями 22.05.1960 г. и 27.02.2010 г. оказался недостаточным для того, чтобы за это время сформировался дефицит в высвобождении M_{0cum} , достаточный для возникновения землетрясения с $M_W=8,8$. Фактический дефицит в высвобождении M_{0cum} составил на начало 2010 г. $3,73 \cdot 10^{21}$ Н·м, что приблизительно в 5 раз меньше сейсмического момента землетрясения 27.02.2010 г. Это позволило сделать вывод, что землетрясение 27.02.2010 г. в значительной

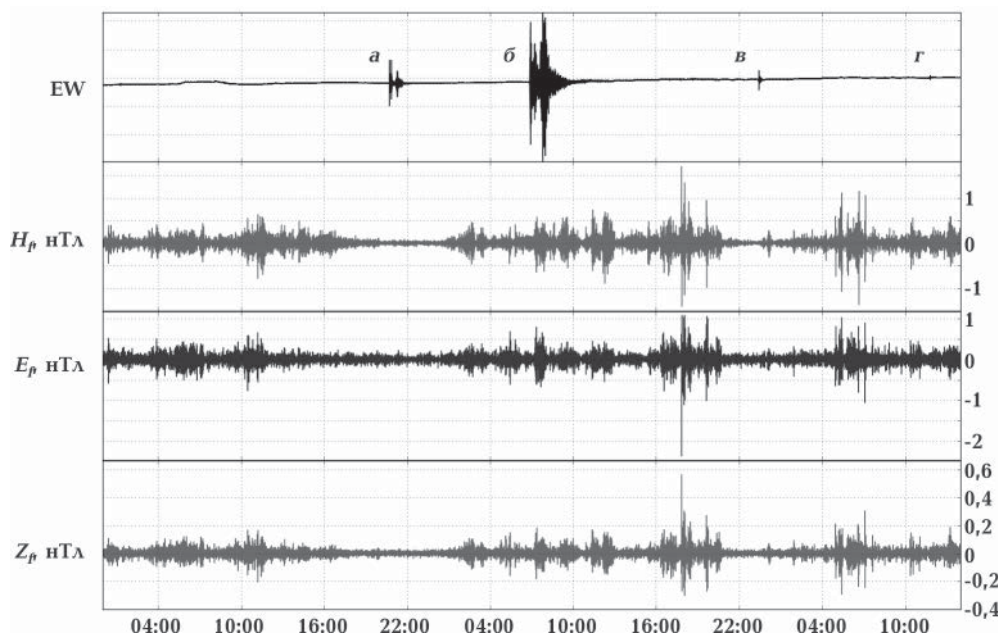


Рис. 9. Северо-Кавказская геофизическая обсерватория ИФЗ РАН. Показания наклонометра восток—запад (*а, б, в, г*) и магнитных вариометров (H_p , E_p , Z_p) при подготовке и развитии крупных сейсмических событий в Северном и Южном полушариях Земли [Собисевич, 2012]: EW — показания наклонометра, установленного в азимут «восток—запад»; *а* — землетрясение в Японии, на о-ве Рюкю 26.02.2010 20:31:23,8, 26,04° с.ш., 128,58° в.д., $H=15$ км; $m_b=7,1$; *б* — катастрофическое цунамигенное землетрясение у побережья Центрального Чили 27.02.2010 06:34:110, 36,122° ю.ш., 7 2,898° з.д.; $H=22,9$ км; $m_b=8,7$; *в* — Афганское землетрясение, район Гиндукуш 27.02.2010 23:21:11, 35,92° с.ш., 70,13° в.д., $H=100$ км; $m_b=5,9$; *г* — землетрясение у побережья Центрального Чили 28.02.2010 11:25:34, 34,76° ю.ш., 71,72° з.д., $H=33$ км, $m_b=6,1$. H , E , Z — составляющие полного вектора, отражающие вариации магнитного поля Земли.

мере было следствием неполной разгрузки после землетрясения 22.05.1960 г.

В период подготовки и развития землетрясения были зафиксированы характерные краткосрочные аномальные магнитные возмущения-предвестники в вариациях магнитного поля Земли (H -, E - и Z -компоненты) и деформаций земной поверхности по данным Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН. Эти наблюдения отражают масштабные перестройки как в самой очаговой зоне, так и в прилегающих объемах геологической среды, отражающиеся в структуре гравимагнитных и геодинамических возмущений уже за несколько часов перед главным ударом [Собисевич, 2012]. Согласно установившейся в физике терминологии, такие сигналы относят к классу гравимагнитных возмущений.

В интервале времени с 04:00 26 февраля 2010 г. до 14:00 28 февраля 2010 г. информационно-измерительные комплексы Северо-



Рис. 10. Составляющие полного вектора магнитного поля Земли и их направления: F — полный вектор магнитного поля Земли, H — северная компонента, E — восточная, Z — вертикальная.

Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН зафиксировали катастрофическое землетрясение Мауле в районе Чили. Одновременно были зарегистрированы еще четыре других сейсмических события с магнитудами более 5, которые произошли на Земле в выделенном временном интервале (рис. 9).

Приступая к анализу полученной гравимагнитной информации, укажем, что в Северо-Кавказской геофизической лаборатории ИФЗ РАН при регистрации вариаций магнитного поля Земли была принята система координат, приведенная на рис. 10. Сейсмические процессы регистрировались высокочувствитель-

ными кварцевыми наклономерами системы Д. Г. Гриднева, а магнитные возмущения — вариометрами системы В. Н. Боброва [Собисевич, 2012].

Итак, в выбранном для анализа временном интервале произошло два землетрясения с магнитудами больше 7 и два — с магнитудами около 6. Они отчетливо отразились в сейсмическом и магнитном полях (см. рис. 9, п. 1). Сопоставление зафиксированных сейсмических событий с гравимагнитными возмущениями, зафиксированными в выбранном временном интервале, позволяет уверенно выполнить временное разделение отдельных возмущений, связать их с конкретными землетрясениями и приступить к анализу гравимагнитных возмущений, вызванных катастрофическим сейсмическим событием (Мауле) у побережья Центрального Чили.

Обратившись к обсерваторским записям землетрясения Мауле (см. рис. 9, п. 1), отметим наличие четкого гравимагнитного возмущения, появившегося в вариациях магнитного поля Земли, за 4 ч перед главным ударом. Отметим, что гравимагнитное возмущение зарегистрировано магнитными вариометрами, установленными на удаленном измерительном пункте Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, который расположен в субавроральной зоне. Здесь функционирует магнитовариационная станция ИЗМИРАН (пос. Карпогоры, Архангельская обл.), которая введена в состав Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН в 2008 г.

Здесь у читателя может возникнуть вопрос: «Почему при анализе землетрясений в 2010 г. авторы не воспользовались данными международной сети «Интермагнет»?» Дело в том, что выделение гравимагнитных возмущений требует секундной оцифровки поступающей геофизической информации, а отдельные станции системы «Интермагнет» на секундную оцифровку стали переходить с начала 2012 г. Все информационно-измерительные системы Северо-Кавказской геофизической обсерватории с момента ввода в эксплуатацию используют секундную оцифровку.

Выраженная в относительных единицах развернутая структура наведенных гравимагнитных возмущений, проявившихся в вариациях магнитного поля Земли за 4 ч перед главным сейсмическим ударом, показана на рис. 11, п. 2. Согласно полученным данным, амплитуда гравимагнитного возмущения не превысила величину в 1,0 нТл.

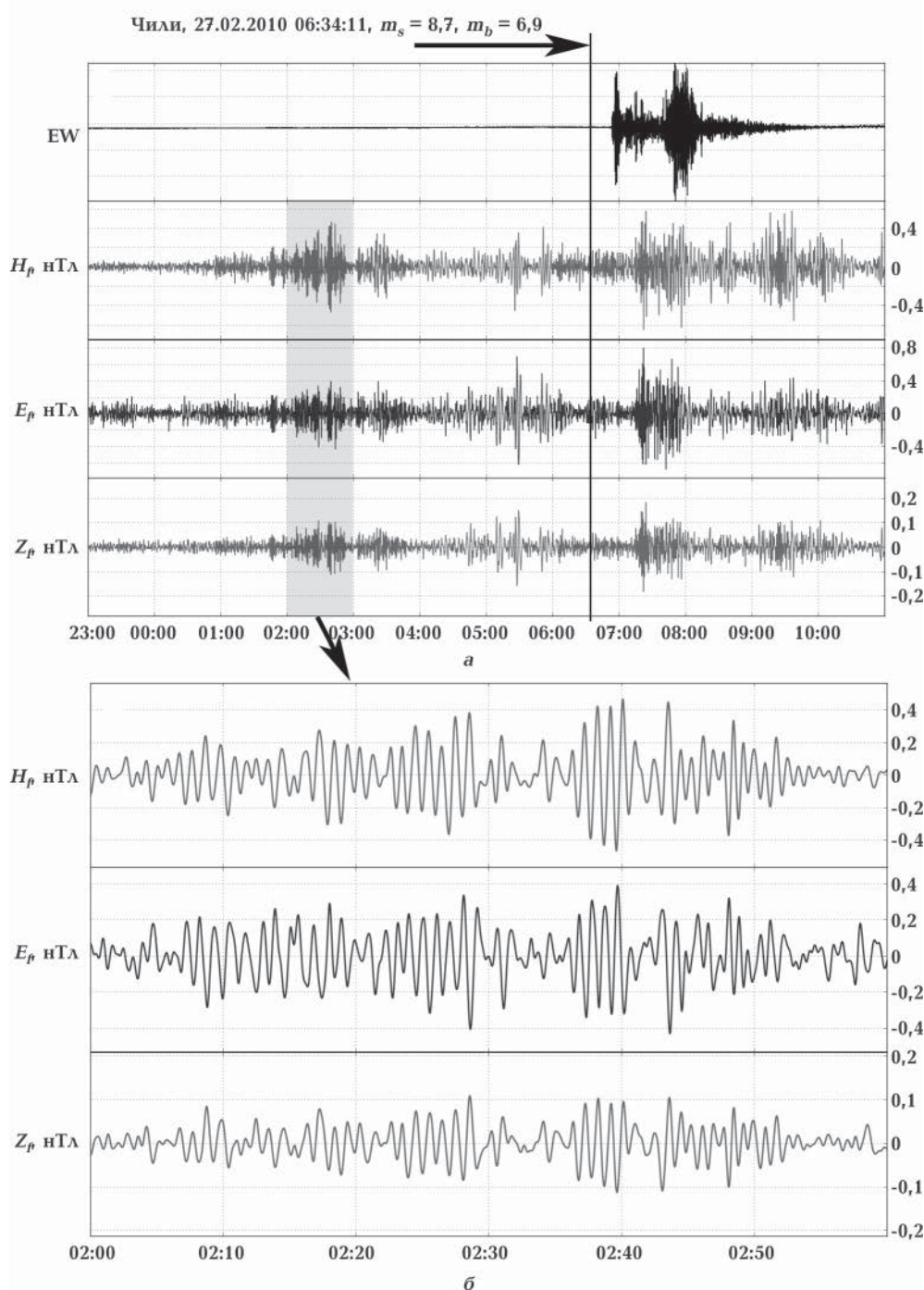


Рис. 11. Побережье Центрального Чили Землетрясение Мауле, 27.02.2010 06:34:110, $36,122^\circ$ ю.ш., $7\ 2,898^\circ$ з.д., $H=22,9$ км, $m_s=8,7$, $m_b=6,9$. Вертикальная линия — время в очаге: EW — показания накломера, установленного в азимуте «восток—запад»: a — H_ρ , E_ρ , Z_ρ — зафиксированные гравимагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне периодов 10—300 с; b — развернутая структура наведенного гравимагнитного возмущения, проявившегося за 4 ч перед сейсмическим событием.

Проанализировав зафиксированное возмущение, отметим, что структура гравимагнитных возмущений может быть охарактеризована как квазигармоническая. Это свидетельствует о наличии в развивающейся очаговой зоне и в прилегающих объемах геологической

среды низкочастотных (с периодами порядка 100 с и более) периодических процессов, в которые вовлечены большие объемы гравитирующих геологических масс.

На основании экспериментально полученного результата можно утверждать, что по мере

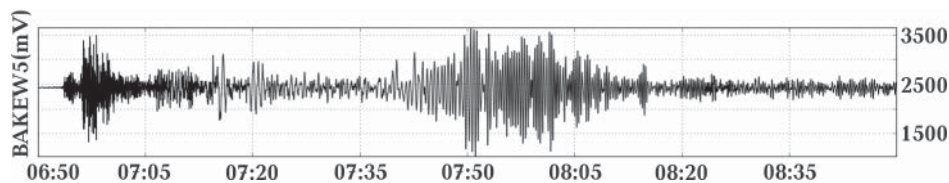


Рис. 12. Побережье Центрального Чили. Землетрясение Мауле. Развернутые показания накломера EW, ориентированного с востока на запад. Здесь удается отчетливо выделить мощный пик поверхностных волн, отражающих структуру гравимагнитного возмущения, которое в процессе своего распространения взаимодействует с постами Северо-Кавказской геофизической обсерватории, что всегда отражается в показаниях магнитных вариометров.

приближения сейсмического удара на последнем этапе подготовки крупного землетрясения «вовлеченные» геологические образования становятся своеобразными низкочастотными резонаторами с распределенной массой и упругостью, а также со всеми присущими таким системам закономерностями.

которой превысили 500 км. По косейсмическим моделям удалось определить, что отрицательное длинноволновое гравитационное возмущение является в первую очередь результатом дилатансии—компакции в больших отдельных объемах геологической среды, когда в результате имплозий или каких-либо других

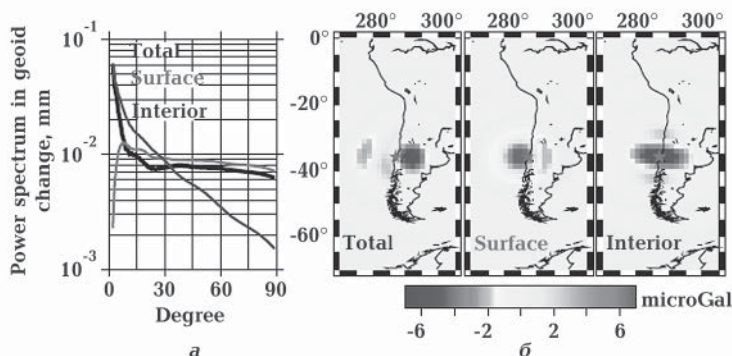


Рис. 13. Прогнозируемое пространственное распределение аномалий силы тяжести по результатам математического моделирования [Han et al., 2010]: *a* — спектр мощности изменений косейсмического геоида вследствие деформации поверхности, внутренней части и общей; *б* — соответствующее пространственное распределение гравитационных изменений. Видно, что положительная гравитационная аномалия включает локальные площади, где отмечено поднятие поверхности, а отрицательная аномалия, обусловленная внутренними изменениями, охватывает и сушу, и акваторию.

Вывод о движении больших масс геологической среды в процессе развития анализируемого землетрясения подтверждается данными спутниковых наблюдений. В статье [Han et al., 2010] анализируются гравитационные процессы в районе рассматриваемого сейсмического события. Показано, что применение современных космических технологий для мониторинга гравитационных аномалий, проявляющихся в районах очаговых зон крупных землетрясений, позволяет оценить масштабы наведенных движений. Такие движения и были зафиксированы после землетрясения Мауле в Чили (рис. 13).

Установлено, что к востоку от эпицентра образовалась гравитационная аномалия (–5 мкГал), основные характерные размеры

геолого-геофизических процессов происходила их трансформация, вызвавшая зафиксированы поверхностные гравитационные движения [Han et al., 2010; Николаевский, Собисевич, 2015].

Одновременно по косейсмическим эффектам были получены данные и о положительной гравитационной аномалии в прибрежной зоне Чили. Она оказалась значительно меньше, поскольку изменения силы тяжести, связанные с поднятием поверхности и внутренней деформацией, имеют противоположные знаки.

Все отмеченные гравитационные возмущения в известной степени отражают характер сейсмического удара, структура которого отчетливо отразилась в наклонах поверхности Земли, зафиксированных аппаратурой Северо-

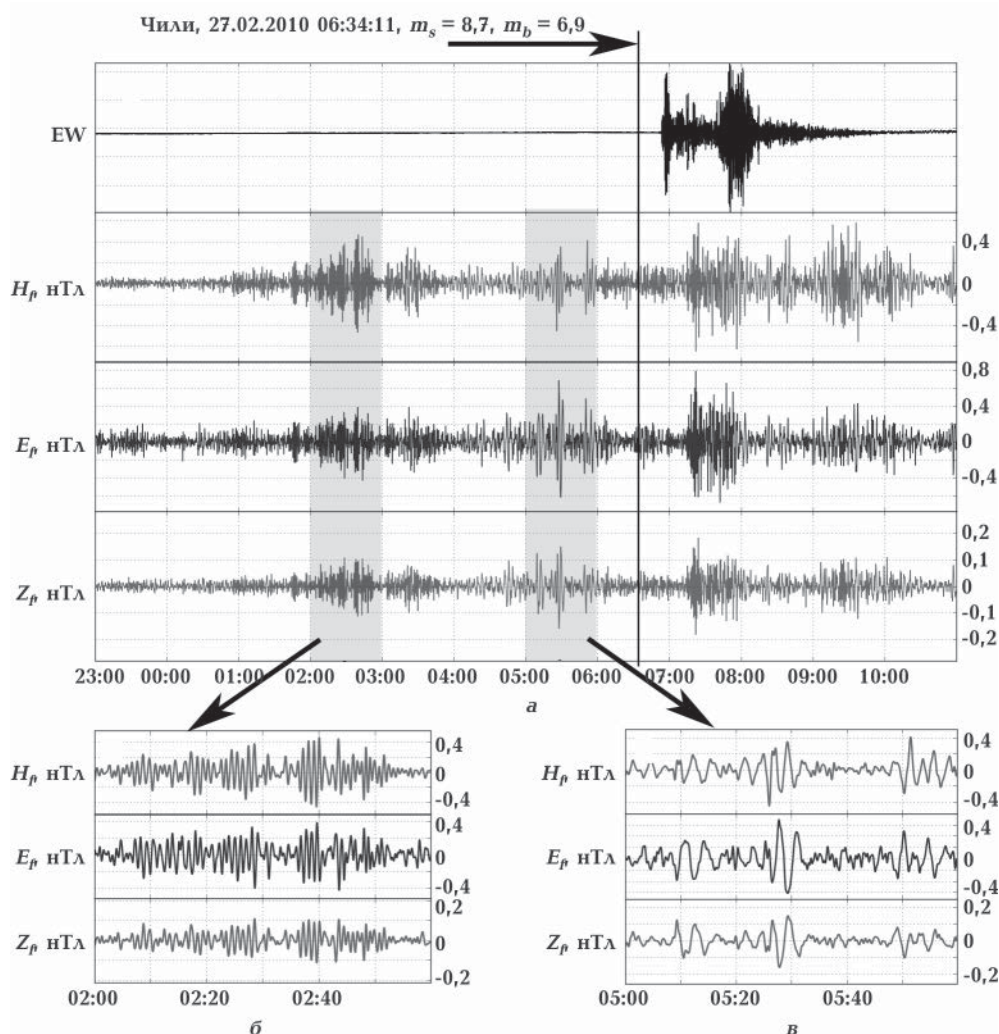


Рис. 14. Побережье Центрального Чили, 27.02.2010 06:34:110, 36,122° ю.ш., 72,898° з.д., $H=22,9$ км, $m_s=8,7$, $m_b=6,9$. Обозначены наклоны EW, событие t , (а); вариации гравимагнитного поля H , E , Z , профильтрованные в диапазоне 10—300 с (б, в).

Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН (см. рис. 12).

На рис. 14, п. 3 выделены и развернуты гравимагнитные возмущения, предваряющие анализируемое событие за час до главного удара.

Сопоставив данные рис. 14, п. 2 и п. 3, видим, что по мере приближения главного удара частота колебаний гравимагнитного возмущения понижается. Зафиксированная закономерность свойственна резонансным образованиям с распределенной массой и упругостью. Эти изменения удастся наблюдать и при других сейсмических процессах, в развитии которых участвуют гравитирующие отдельные масштабы геологических структур [Николаевский, Собисевич, 2015].

В заключение для сравнения приведем структуру гравимагнитных возмущений, отра-

жающих низкочастотные колебательные процессы при развитии глубокофокусного землетрясения в Афганистане. Оно произошло несколько часов спустя после землетрясения Мауле. Несмотря на то, что в этом регионе глубинное геологическое строение отличается от условий района, где произошло мелкофокусное цунамигенное событие Мауле, тоже виден отчетливый аномальный гравимагнитный «предвестниковый» сигнал, величина которого достигает 3,0 нТл. Четкие возмущения появились уже за 11 ч до главного удара. Следующий цикл колебаний отмечен в период с 18 до 21 ч. Сопоставив структуру развернутых форм колебаний двух сейсмических событий, можно отметить, что глубокофокусные гравимагнитные возмущения отличаются по форме и внутренней структуре от чилийских возму-

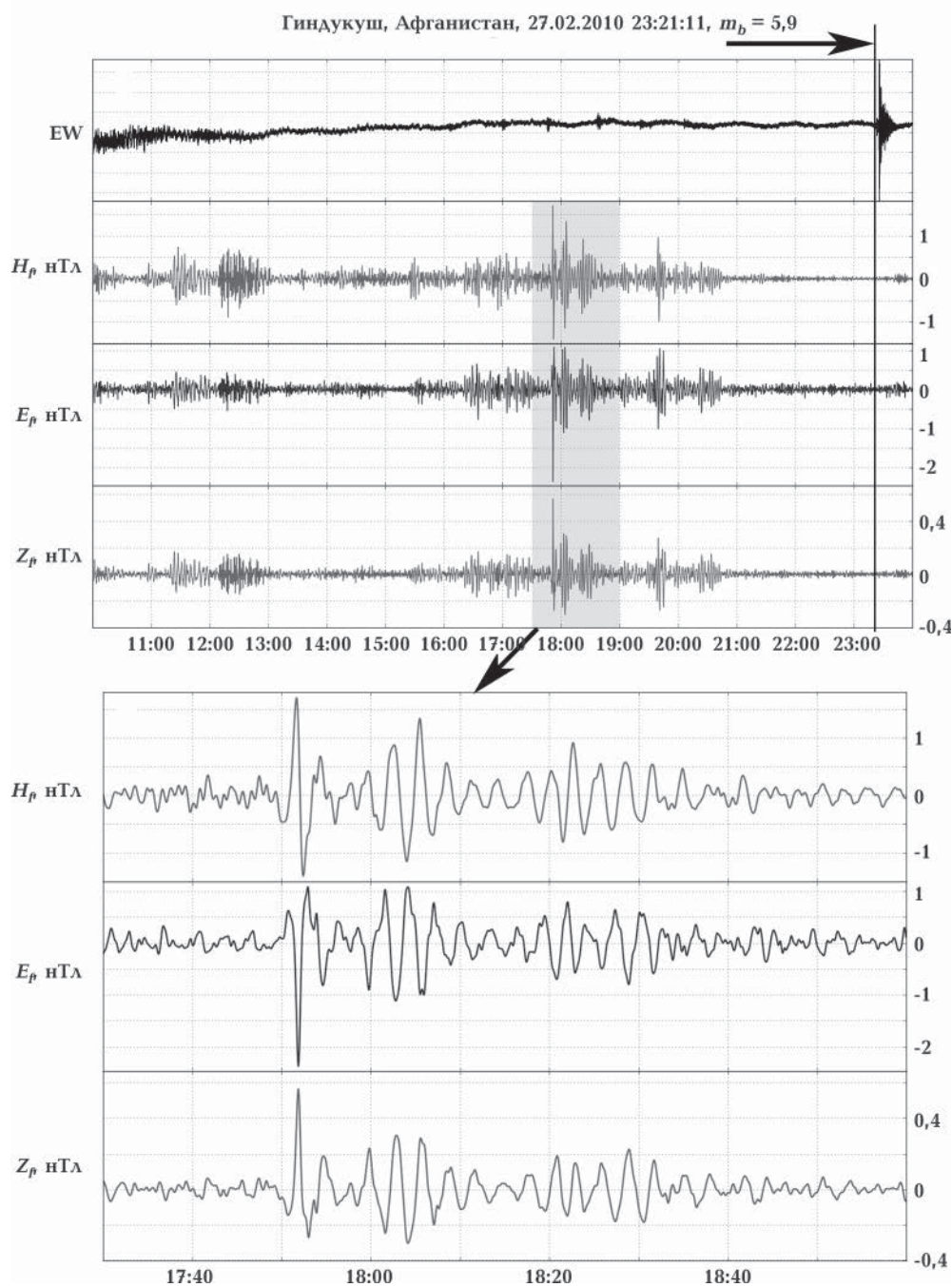


Рис. 15. Район Гиндукуш, Афганистан, 27.02.2010 23:21:11, $35,92^\circ$ с.ш., $70,13^\circ$ в.д., $H=100$ км, $m_b=5,9$. Обозначены наклоны в направлении EW (восток—запад); вариации магнитного поля H , E , Z , профильтрованные в диапазоне периодов 10—300 с.

щений. Этот факт свидетельствует о том, что здесь гравитирующие объемы геологической среды развивались в условиях высоких давлений и температур, что не могло не отразиться и на амплитуде гравимагнитного возмущения.

Обсуждение результатов. Землетрясение 2010 г. Мауле можно было успешно спрогно-

зировать как в долгосрочном и среднесрочном, так и в краткосрочном аспектах. Ретроспективный анализ сейсмологического режима в период 1960—2010 гг. показал, что его очаг заполнил существовавшую на протяжении 25 лет «сейсмическую брешь» между очаговыми зонами землетрясений 1960 г. с $M=9,5$ и 1985 г. с

$M=8,0$. Размер «бреши» составил около 400 км, и в этой зоне регистрировалось глубокое сейсмическое затишье, т. е. уже за 10 лет до события можно было прогнозировать возникновение здесь сильного толчка.

Наблюдения за деформациями поверхности методом GPS измерений в зоне готовящегося землетрясения показали существенное резкое уменьшение скоростей горизонтальных движений поверхности материкового склона в интервале расстояний 80—120 км от глубоководного желоба (в зоне очага готовящегося землетрясения) на величину около 15 мм/г [Mogeno et al., 2008, 2010]. Этот эффект вполне можно рассматривать в качестве среднесрочного предвестника землетрясения Мауле, произошедшего около 2 лет спустя. Сходные результаты по оценке деформаций поверхности по данным GPS наблюдений были получены в зоне сильнейших Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. на Центральных Курилах.

Краткосрочное прогнозирование сейсмического события было бы возможно при использовании записей на удаленных геофизических обсерваториях. Отмеченные гравимагнитные возмущения стали предвестниками мощного сейсмического удара, структура которого отчетливо отразилась в наклонах поверхности Земли, зафиксированных аппаратурой Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и в субавроральной зоне на обсерватории Карпогоры. Однако эти краткосрочные предвестники до настоящего времени не используются в практике прогноза сильнейших землетрясений, хотя и выглядят очень перспективными.

Такое состояние исследований в рамках решения проблемы прогнозирования землетрясений с использованием геомагнитной прогностической информации обусловлено несколькими причинами.

Во-первых, в последние годы международным коллективом ученых разрабатывается научное направление, связанное с анализом геомагнитных аномалий в магнитном поле Земли аппаратурными комплексами, расставленными на поверхности так, что район, где должно произойти сейсмическое событие, оказывается охваченным ими полностью. Приборы расставляются в соответствии с разработанными оптимальными методами измерений. Наблюдения ведутся непрерывно в течение длительного времени (несколько месяцев), а прогностические признаки надвигающейся сейсмической катастрофы определяются в ре-

зультате статистического анализа зафиксированных вариаций магнитного поля Земли. При этом все аппаратурные комплексы связаны в единую измерительную систему и охватывают широкий диапазон частот [Hayakawa, Fujinawa, 1994; Hayakawa et al., 1996; Копытенко и др., 2000; Schekotov et al., 2007]. Получаемые экспериментальные данные и являются той информационной базой, которая в дальнейшем используется при среднесрочном прогнозировании крупных сейсмических катастроф.

Во-вторых, в УНЧ-диапазоне сформировалось отдельное научное направление, в котором основное внимание отводится изучению информативных локальных гравимагнитных возмущений, предшествующих крупным землетрясениям в масштабах Земли. При этом геомагнитные информационно-измерительные системы располагаются произвольно [Собисевич, 2012; Собисевич и др., 2014; Рогожин и др., 2016]. Установлено, что фиксируемые аномальные локальные УНЧ-возмущения в вариациях магнитного поля Земли несут богатую информацию о гравитационных процессах и локальных перестройках в крупных геологических структурах, ответственных за формирование очаговых зон.

Эти информационные данные всегда удается получить заранее перед крупными сейсмическими событиями. Наиболее отчетливо они выделяются за 3—4 ч до главного удара (см. рис. 7).

Анализ морфологических признаков в структуре наблюдаемых волновых форм гравимагнитных возмущений дает некоторое представление о том, где развивается очаг. Однако в целом задача по выделению района и определению места ожидаемого сейсмического события пока остается не решенной до конца. Возможно в этом поможет выявленная в последнее время приуроченность областей с повышенной сейсмичностью к вековым аномалиям существенного прироста и мантийно-литосферной и компоненты геомагнитного поля [Орлюк и др., 2016].

Первая причина в основном организационная. Необходимо вести постоянный мониторинг сейсмических и магнитных процессов на Земле.

Вторая причина связана с отсутствием специализированных аппаратурных комплексов, обеспечивающих быструю оцифровку больших массивов информации, поступающих из многих наблюдательных пунктов, размещенных в разных местах планеты. Эти данные в дальнейшем должны стать основой для построения

практически значимой технологии выделения областей генерации аномальных гравимагнитных возмущений, отражающих масштабы и место будущей очаговой области.

На Земле землетрясения с магнитудами больше шести происходят довольно часто. Проанализированные в настоящей статье результаты тому пример. Все они сопровождаются характерными гравимагнитными возмущениями, которые фиксируются всеми магнитовариационными станциями Международной системы «Интермагнет», включая магнитовариационные станции, установленные на Северном Кавказе и в субавроральной зоне европейской части России. Сегодня потенциальные возможности развиваемого научного направления дают основания для оптимизма.

Выводы. Проведенные сейсмологические, геодезические и геофизические наблюдения в процессе подготовки очага сильнейшего цунамигенного землетрясения Мауле в комплексе могли бы составить надежную основу для его долго-, средне- и краткосрочного прогнозирования. При этом в среднесрочном аспекте по данным наблюдений сети приборов GPS в

центральной части Чили сейсмическое событие было спрогнозировано практически уже за 2 года до главного толчка.

Анализ сейсмологических данных о ходе афтершокового процесса позволил в режиме, близком к реальному времени, предсказать возникновение серии трех сильнейших повторных толчков 11—16 марта 2010 г.

Краткосрочное прогнозирование сейсмического события было бы возможно при использовании записей на удаленных геофизических обсерваториях. Отмеченные гравитационные возмущения стали предвестниками мощного сейсмического удара, структура которого отчетливо отразилась в наклонах поверхности Земли, зафиксированных аппаратурой Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и в субавроральной зоне на обсерватории Карпогоры. Однако эти краткосрочные предвестники до настоящего времени не используются в практике прогноза сильнейших землетрясений, хотя и представляются весьма перспективными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-29-02046).

Список литературы

- Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Копытенко Е. А., Воронов П. М., Зайцев Д. Б. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений. Докл. АН. Сер. Геофизика. 2000. Т. 371. № 5. С. 685—687.
- Лутиков А. И. Сейсмический мониторинг очаговых зон сильных землетрясений. Физика Земли. 2008. № 3. С. 9—21.
- Николаевский В. Н., Собисевич Л. Е. Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара. Геофиз. журн. 2015. Т. 37. № 4. С. 51—74.
- Орлюк М. І., Марченко А. В., Романець А. О. Сейсмічність Землі та вікові зміни її головного мантійного поля. Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища. Матеріали VI Міжнародної наукової конференції 20—23 вересня 2016 р. Львів, СПОЛОМ. 2016. С. 202—204.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с трансформными разломами. Геофиз. журн. 2012. Т. 34. № 4. С. 224—234.
- Рогожин Е. А., Лутиков А. И., Собисевич Л. Е., То Шэнь, Канониги К. Х. Землетрясение Горкха 25 апреля 2015 г. в Непале: тектоническая позиция, афтершоковый процесс и возможности прогнозирования развития сейсмической ситуации. Физика Земли. 2016. № 4. С. 67—83.
- Собисевич А. Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Москва: Изд-во ИФЗ РАН, 2012. 510 с.
- Собисевич Л. Е., Канониги К. Х., Собисевич А. Л. Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями. Докл. АН. Сер. Геофизика. 2009. Т. 429. № 5. С. 688—672.
- Собисевич Л. Е., Рогожин Е. А., Собисевич А. Л., Канониги К. Х., Кендзера А. В., Марченко А. В., Орлюк М. И. Аномальные волновые возмущения, наведенные Сычуаньским землетрясением 20 апреля 2013 г. ($M_s=7.0$). Геофиз. журн. 2014. Т. 36. № 4. С. 37—49.
- Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониги К. Х. Аномальные геомагнитные возмущения, наведенные катастрофическими цунамигенными землетрясениями в районе Индонезии. Геофиз. журн. 2012. Т. 34. № 5. С. 22—37.
- Hayakawa M., Fujinawa Y., 1994. Electromagnetic Phe-

- nomena Related to Earthquake Prediction. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp., 677 p.
- Hayakawa M., Molchanov O. A., Ondoh T., Kawai E., 1996. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals. *J. Comm. Res. Lab., Tokyo* 43, 169—180.
- Han S.-C., Sauber J., Luthcke S., 2010. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophys. Res. Lett.* 37, L23307. doi:10.1029/2010GL045449.
- Kanamori H., Cipar J. J., 1974. Focal process of the Great Chilean earthquake May 22 1960. *Phys. Earth Planet. Int.* 9, 128—136.
- Kikuchi M., Kanamori H., 1995. The Shikotan earthquake of October 4, 1994: lithospheric earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 22(9), 1025—1028.
- Lutikov A., 2010. Destructive earthquake at coast of Central Chile on February, 27th, 2010. Seismic history and the preliminary analysis of aftershock process initial stage. http://www.conference-service.com/ESC2010/download/gi3u7ox5/d0654_0843.pdf.
- Melnick D., Moreno M., Motagh M., Cisternas M., Wes-son R., 2012. Splay fault slip during the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Geology* 40(3), 251—254.
- Moreno M., Klotz J., Melnick D., Echtler H., Bataille K., 2008. Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36—39 S). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(12), Q12024. <http://dx.doi.org/10.1029/2009GC002905>
- Moreno M., Rosenau M., Oncken O., 2010. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature* 467, 198—202. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09349>
- Schekotov A. Y., Molchanov O. A., Hayakawa M., Fedorov E. N., Chebrov V. N., Sinitsin V. I., Gordeev E. E., Belyaev G. G., Yagova N. V., 2007. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity. *Radio Sci.* 42, RS6S90. doi:10.1029/2005RS00
- Han S.-C., Sauber J., Luthcke S., 2010. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophys. Res. Lett.* 37, L23307. doi:10.1029/2010GL045449.

Abnormal geophysical and seismotectonic processes observed during the period of preparation and development of the earthquake with a magnetude of 8,8 in Maule 2010 (Chile)

© L. E. Sobisevich, V. I. Starostenko, E. A. Rogozhyn, A. I. Lutikov, A. L. Sobisevich, K. H. Kanonidi, A. V. Kendzera, M. I. Orlyuk, 2016

Focal zone, basic shock, jerking of strongest aftershocks and progress of seismic energy release during the aftershock process of the earthquake Maule 27.02.2010 ($M_W=8,8$) in Chile have been analyzed. Macroseismic manifestations, tectonic position of the focus and reconstruction of acting plane position in the focus have been considered. Geophysical treatment of anomalous gravimagnetic disturbances and seismic precursors induced in variations of magnetic field and geoacoustic fields of the Earth during preparation of the basic shock and of three strongest iterative shocks on March 11—16 2010 has been done for the first time. It has been shown that application of present-day cosmic observations, which allow to analyze gravity disturbances (so far only coseismic), reflected on the Earth's surface makes possible to consider the precursors of seismic shocks of the earthquake Maule and other seismic events in a new way. Long-, middle- and short-term approaches to prognostication of strong seismic events both on land and sea have been stated.

Key words: seismic activity, earthquake, focus, fluids, anomalous geophysical, seismological and seismotectonic processes, epicenter, aftershocks, gravimagnetic perturbations.

References

- Kopytenko Ju. A., Ismagilov V. S., Kopytenko E. A., Voronov P. M., Zaytsev D. B., 2000. Magnetic location sources of geomagnetic disturbances. *Doklady AN. Ser. Geofizika* 371(5), 685—687 (in Russian).
- Lutikov A. I., 2008. Seismic monitoring of source zones of strong earthquakes. *Fizika Zemli* (3), 9—21 (in Russian).

- Nikolayevskiy V. N., Sobisevich L. E., 2015. The nature of bifocal source of the earthquake and precursors of the blow. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(4), 51—74 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A. V., Romenets A. O., 2016. Seismicity of the Earth, and age-related changes of its main mantle field. Geophysical technology forecasting and monitoring of the geological environment. *Proceedings of the VI International Scientific Conference 20—23 September 2016, Lviv*. P. 202—204 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 2012. Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation with transcrustal faults. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 224—234 (in Russian).
- Rogozhin E. A., Lutikov A. I., Sobisevich L. E., To Shen, Kanonidi K. Kh., 2016. Gorkha earthquake April 25, 2015 in Nepal: tectonic position, aftershocks and the possibility of predicting the development of seismic situation. *Fizika Zemli* (4), 67—83 (in Russian).
- Sobisevich A. L., 2012. Selected mathematical problems of geophysics, volcanology and Geoecology. Vol. 2. Moscow: Publishing House of the IPE RAS, 510 p. (in Russian).
- Sobisevich L. E., Kanonidi K. Kh., Sobisevich A. L., 2009. Ultra-low electromagnetic disturbances that occur before strong seismic events. *Doklady AN. Ser. Geofizika* 429(5), 688—672 (in Russian).
- Sobisevich L. E., Rogozhin E. A., Sobisevich A. L., Kanonidi K. Kh., Kendzera A. V., Marchenko A. V., Orlyuk M. I., 2014. Anomalous wave perturbations induced by the Sichuan earthquake on April 20 2013 (Ms=7.0). *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 37—49 (in Russian).
- Sobisevich L. E., Sobisevich A. L., Kanonidi K. Kh., 2012. Anomalous geomagnetic disturbances induced catastrophic tsunamigenic earthquake near Indonesia. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(5), 22—37 (in Russian).
- Hayakawa M., Fujinawa Y., 1994. Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction. Tokyo: Terra Scientific Pub. Comp., 677 p.
- Hayakawa M., Molchanov O. A., Ondoh T., Kawai E., 1996. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals. *J. Comm. Res. Lab., Tokyo* 43, 169—180.
- Kanamori H., Cipar J. J., 1974. Focal process of the Great Chilean earthquake May 22 1960. *Phys. Earth Planet. Int.* 9, 128—136.
- Kikuchi M., Kanamori H., 1995. The Shikotan earthquake of October 4, 1994: lithospheric earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 22(9), 1025—1028.
- Lutikov A., 2010. Destructive earthquake at coast of Central Chile on February, 27th, 2010. Seismic history and the preliminary analysis of aftershock process initial stage. http://www.conference-service.com/ESC2010/download/gi3u7ox5/d0654_0843.pdf.
- Melnick D., Moreno M., Motagh M., Cisternas M., Weston R., 2012. Splay fault slip during the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Geology* 40(3), 251—254.
- Moreno M., Klotz J., Melnick D., Echtler H., Bataille K., 2008. Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36—39 S). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(12), Q12024. <http://dx.doi.org/10.1029/2009GC002905>
- Moreno M., Rosenau M., Oncken O., 2010. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature* 467, 198—202. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09349>
- Schekotov A. Y., Molchanov O. A., Hayakawa M., Fedorov E. N., Chebrov V. N., Sinitsin V. I., Gordeev E. E., Belyaev G. G., Yagova N. V., 2007. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity. *Radio Sci.* 42, RS6S90. doi:10.1029/2005RS003441.
- Han S.-C., Sauber J., Luthcke S., 2010. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophys. Res. Lett.* 37, L23307. doi:10.1029/2010GL045449.