

**SEISMOGRAVITATIONAL PROCESSES ACCOMPANYING THE EVOLUTION
OF SEISMIC FOCAL STRUCTURES IN THE LITHOSPHERE****A.L. Sobisevich, L.E. Sobisevich, D.V. Likhodeev**

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

ABSTRACT. Observations reflecting the structure and conditions of the seismogravitational process in the lithosphere were analyzed using the data on the catastrophic tsunamigenic earthquake of Maule (Chile) [Sobisevich *et al.*, 2019]. Seismogravitational processes were first identified by a group of Soviet scientists from the city of Leningrad (now St. Petersburg) under the leadership of Professor E.M. Linkov [Linkov *et al.*, 1982, 1990]. The study of these processes continues at the North Caucasus Geophysical Observatory of IPE RAS, which was established in 2004. Experiments are carried out using unique quartz tiltmeters designed by D.G. Gridnev, which ensure the stable registration of long-period seismogravitational processes on the scale of the Earth [Sobisevich, 2013; Sobisevich *et al.*, 2017].

KEYWORDS: preparation of strong earthquakes; seismogravitational process; dilatancy structure; variations of ULF magnetic field

FUNDING: This study was carried out as part of the State Assignment of IPE RAS with a grant from the President of the Russian Federation for the state support of leading scientific schools (Grant NSh 5545.2018.5).

SHORT COMMUNICATIONReceived: July 9, 2019
Revised: November 25, 2019
Accepted: December 4, 2019

FOR CITATION: Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Likhodeev D.V., 2020. Seismogravitational processes accompanying the evolution of seismic focal structures in the lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (1), 53–61. doi:10.5800/GT-2020-11-1-0462

СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЭВОЛЮЦИЮ СЕЙСМОФОКАЛЬНЫХ СТРУКТУР ЛИТОСФЕРЫ

А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич, Д.В. Лиходеев

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

АННОТАЦИЯ. На примере катастрофического цунамигенного землетрясения Мауле (Чили) анализируются результаты обсерваторских наблюдений, отражающие структуру и условия формирования сейсмогравитационного процесса в литосфере [Sobisevich et al., 2019]. Показано, что сейсмогравитационные процессы были впервые выделены группой советских ученых из г. Ленинграда (ныне г. Санкт-Петербург) под руководством профессора Е.М. Линькова [Linkov et al., 1982, 1990]. Изучение этих процессов продолжается на базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, которая была развернута в 2004 г. В экспериментах задействованы уникальные кварцевые наклонометры системы Д.Г. Гриднева, которые обеспечивают устойчивую регистрацию длиннопериодных сейсмогравитационных процессов в масштабах Земли [Sobisevich, 2013; Sobisevich et al., 2017].

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подготовка сильных землетрясений; сейсмогравитационный процесс; дилатансная структура; УНЧ вариации магнитного поля

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Настоящая работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ № НШ 5545.2018.5.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмогравитационные процессы и гравитомангнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли, которые удается наблюдать перед крупными землетрясениями, активно изучаются со второй половины XX в. В 1964 г. были обнаружены аномальные магнитные возмущения, сформировавшиеся перед катастрофическим цунамигенным сейсмическим событием на Аляске, которое произошло 27 марта 1964 г. Об этом открытии сообщил в своей статье Д. Мур [Moore, 1964]. Анализируя данные магнитометра, ученый в структуре магнитного поля выделил характерные аномалии в диапазоне сверхнизких частот ($ULF \leq 10$ Гц) за два часа до начала одного из самых разрушительных цунамигенных землетрясений в истории Земли. В дальнейшем обозначенная проблема изучалась несколькими научными группами с использованием нового поколения геофизических информационно-измерительных систем [Fraser-Smith, 2008; Kopytenko et al., 1993; Schekotov et al., 2007; Guglielmi et al., 2014].

Сейсмогравитационные процессы были открыты спустя восемь лет после публикации Д. Мура. В семидесятые годы XX в. учеными кафедры физики Земли физического факультета Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) университета под руководством профессора Е.М. Линькова получены данные о сейсмогравитационных возмущениях (пульсациях), предваряющих крупные сейсмические события. Е.М. Линьков впервые в сейсмологической практике использовал для выделения слабого сейсмогравитационного процесса магнетронную систему съема информации с длиннопериодного сейсмографа и создал сейсмические приборы, которые имели высокую по тем временам чувствительность [Linkov, 1987; Linkov et al., 1982, 1990].

В числе научных результатов ленинградских ученых отметим наблюдения, которые позволили проанализировать сейсмогравитационные возмущения перед катастрофическим землетрясением в Армении 7 декабря 1988 г., когда город Спитак был полностью разрушен, а вместе с ним и десятки окрестных сел. Число погибших достигло 40 тыс.

Группой профессора Е.М. Линькова в синхронных записях длиннопериодного сейсмографа и микробарографа были выделены низкочастотные сейсмогравитационные колебания, которые предшествовали главному удару (рис. 1, а).

Характерная запись сейсмогравитационного процесса получена группой Е.М. Линькова при анализе подготовки телесеизмического события в окрестностях г. Сан-Франциско 17 октября 1989 г. (рис. 1, б). Еще один пример успешной регистрации сейсмогравитационных процессов представлен на рис. 2 (землетрясение на Филиппинах, $M=6.4$, глубина очага ~ 40 км).

Это были последние работы группы Е.М. Линькова, в которых показано, что сейсмогравитационные процессы, развивающиеся на фоне «созревающей» геофизической катастрофы, проявляются на общем сейсмогравитационном фоне в виде длиннопериодных колебаний, наведенных гравитирующими образованиями горной породы.

2. МЕТОДЫ

Длиннопериодные сейсмогравитационные колебания удается наблюдать перед сильными землетрясениями задолго до главного удара, что указывает на неизвестный источник их возбуждения. Дальнейшее изучение открытого явления показало, что колебательные подвижки больших объемов горной породы, участвующей в формировании очаговых структур крупных

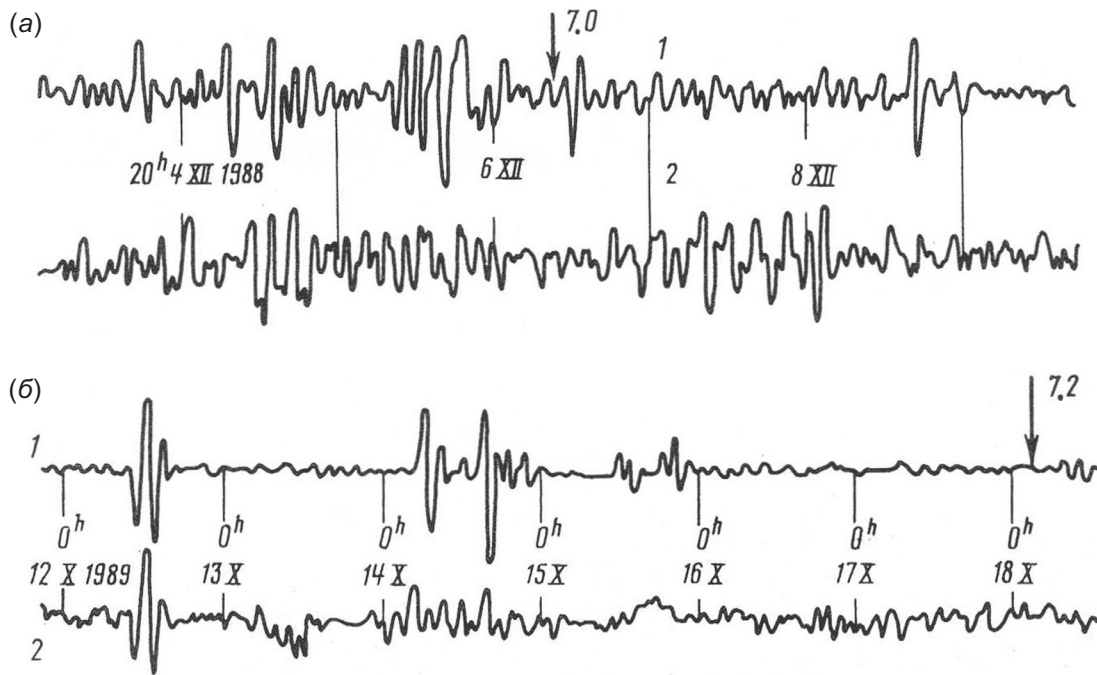


Рис. 1. Сейсмогравитационные пульсации в синхронных записях сейсмографа (1) и микробарографа (2) перед Спитакским землетрясением 1988 г., $M=6.8$ (а) и землетрясением 1989 г., $M=7.2$, в г. Сан-Франциско (б) [Linkov et al., 1990].

Fig. 1. Seismogravimetric pulsations in the synchronous records of a seismograph (1) and a microbarograph (2) before the 1988 Spitak earthquake ($M=6.8$) (a) and the 1989 San-Francisco earthquake ($M=7.2$) (b) [Linkov et al., 1990].

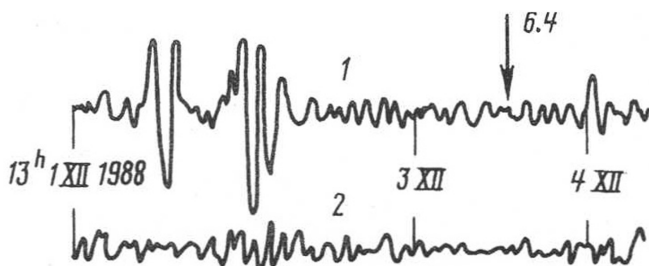


Рис. 2. Сейсмогравитационные пульсации в синхронных записях сейсмографа (1) и микробарографа (2) перед землетрясением 1988 г. на Филиппинах, стрелкой отмечен момент главного удара [Linkov et al., 1990].

Fig. 2. Seismogravimetric pulsations in the synchronous records of a seismograph (1) and a microbarograph (2) before the 1988 earthquake in the Philippines. Arrow – main shock [Linkov et al., 1990].

землетрясений, находят свое отражение в естественных геофизических полях Земли [Sobisevich, 2013; Nikolaevskiy, Sobisevich, 2015; Sobisevich et al., 2019].

В последние годы получены новые фундаментальные знания, которые не только подтверждают, но и развивают открытие ленинградских ученых [Sobisevich et al., 2019]. Установлено, что сейсмогравитационные процессы, возникающие перед крупными сейсмическими событиями, удается зафиксировать аппаратными методами и проанализировать непосредственно в момент главного удара.

Интересные результаты получены группой зарубежных исследователей, которым удалось выделить волновые формы в записях сейсмоприемников, установленных на удалении до 2 тыс. км от очага катастрофического цунамигенного землетрясения Тохоку (район о. Рюкю, Япония) [Vallée et al., 2017]. Авторы статьи анализируют «упругогравитационные» (по Е.М. Линькову – сейсмогравитационные) волновые формы, которые опережали сейсмические волны из эпицентра

сейсмического события, распространяясь со скоростью света. И хотя другие исследователи считают слабообоснованной технологию ретроспективного анализа сейсмических полей, представленную в статье [Vallée et al., 2017], сам факт возможности регистрации сейсмогравитационных волн, предшествующих прямым сейсмическим волнам, не отрицается [Kimura et al., 2019].

Открытие гравитационных волн [Ade et al., 2014] и другие научные результаты, полученные в последние годы, заставляют переосмыслить некоторые прежние подходы к объяснению сейсмогравитационных процессов, наблюдаемых в геосферах Земли. Сегодня ученым предстоит оценить роль и значение подвижек больших образований горной породы в окрестности формирующихся очаговых структур. Именно в этой, подверженной сильным деформациям, области литосферы «рождаются» выделенные инструментальными методами длиннопериодные сейсмогравитационные процессы и УНЧ гравитомагнитные волновые возмущения, которые сопровождают процесс подготовки крупных

сейсмических событий [Ismaguilov et al., 2001, 2003; Kopytenko et al., 1993; Gokhberg et al., 2011; Sobisevich, 2018; Sobisevich et al., 2017, 2019].

В нынешнем столетии ряд сильнейших землетрясений потряс Японию, Индонезию, Китай, побережье Чили и другие сейсмоопасные регионы Земли. Полученные данные инструментальных наблюдений сейсмогравитационных процессов и сопутствующих гравитомагнитных возмущений, предвещающих эти события, позволили проанализировать условия развития отдельного класса аномальных волновых структур на этапе формирования очаговых зон крупных землетрясений.

Полученные научные данные позволяют переосмыслить некоторые прежние подходы к объяснению наблюдаемых сейсмогравитационных процессов. И здесь результаты прямых аппаратных измерений приборными комплексами современных геофизических обсерваторий трудно переоценить.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В конце 2004 г. была введена в строй Северокавказская геофизическая обсерватория ИФЗ РАН (рис. 3). В период с 2004 по 2018 г. информационно-измерительные системы обсерватории зафиксировали ряд

крупных сейсмических событий. В числе таких землетрясений особое место занимает катастрофическое цунамигенное землетрясение вблизи побережья Чили, которое будет проанализировано ниже [Sobisevich et al., 2016]. Это легко сделать, принимая во внимание то, что район хорошо изучен и можно наглядно представить условия развития сейсмогравитационного процесса.

Западное побережье Чили относится к одному из наиболее активных в сейсмическом отношении районов Южной Америки. Здесь 22 мая 1960 г. произошло самое сильное в истории Земли цунамигенное землетрясение, которое было инструментально зарегистрировано. Его магнитуда составила 9.5, а колебания продолжались около 10 мин. Высокая сейсмическая активность в этом регионе обусловлена сложным геологическим строением. 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 нередко сопровождаются сильными цунамигенными землетрясениями.

В начале нынешнего столетия у берегов Чили произошло катастрофическое цунамигенное землетрясение (Мауле, 27 февраля 2010 г., $M=8.8$) [Moreno et al.,

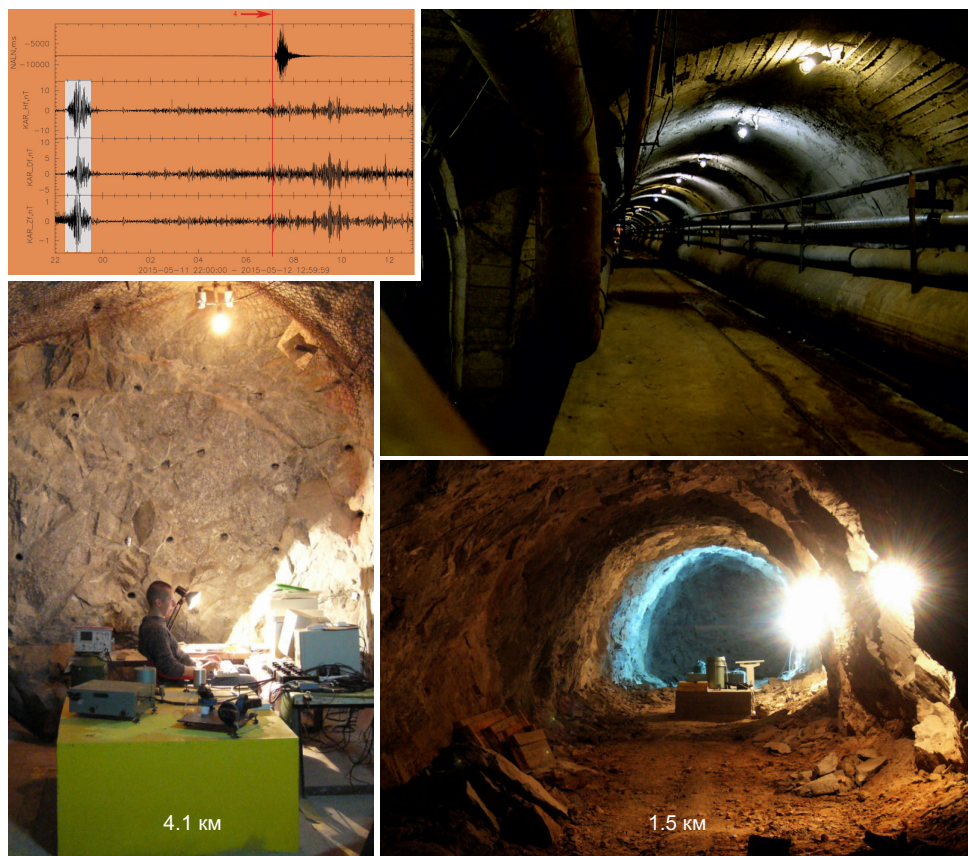


Рис. 3. Общий вид двух геофизических лабораторий Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН. Лаборатории размещены в боковых вырубках штолен «Главная» (углубление 1.5 км) и «Вспомогательная» (углубление 4.1 км) Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН [Sobisevich, 2013].

Fig. 3. General view of two geophysical laboratories of the North Caucasus Geophysical Observatory of IPE RAS. The laboratories are located in the side cuts of the Glavnaya (1.5 km depth) and Vspomogatelnaya (4.1 km depth) mining channels of the Baksan Neutrino Observatory of the Institute for Nuclear Research (INR RAS) [Sobisevich, 2013].

2010; Melnick et al., 2012]. На базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН были получены и проанализированы представительные материалы о гравитомангнитных возмущениях и сейсмогравитационных процессах на этапе «созревания» эндогенной катастрофы [Sobisevich, 2013; Nikolaevskiy, Sobisevich, 2015; Sobisevich et al., 2019].

Приступая к анализу катастрофического цунамигенного землетрясения Мауле, отметим, что его эпицентр располагался в прибрежной зоне материкового склона Тихого океана (координаты $\varphi=35.846^\circ$ S, $\lambda=72.719^\circ$ W по данным Геологической службы США, каталог NEIC <http://earthquake.usgs.gov>), приблизительно в 400 км к С-СВ от эпицентра Большого Чилийского землетрясения 22 мая 1960 г. ($M_w=9.5$) и в 150 км к северу от города Концепсьон (~350 км к юго-западу от Сантьяго). Гипоцентр был определен на глубине ~35 км, а интенсивность сотрясений на берегу Чили в зоне, близкой к эпицентру, составила 8 баллов модифицированной шкалы Меркалли. Сейсмические удары, превышающие семь баллов, охватили всю центральную часть Чили от 37 до 40° ю.ш.

Анализ распределения эпицентров афтершоков первых пяти дней землетрясения Мауле по состоянию на 6 апреля (по данным NEIC) показал, что длина очаговой области, вытянутой в близмеридиональном направлении, составила около 600 км при ширине около 250 км. При этом глубина гипоцентров главного и всех повторных толчков изменялась в пределах от 30 до 40 км. Тип движения в очаге: надвиг с небольшой компонентой правостороннего сдвига. В геодинамическом отношении такое решение для очага говорит об имеющем место надвигании континентальной плиты на океаническую, а сам очаг может быть отнесен к разряду межплитных [Sobisevich, 2018].

В период подготовки землетрясения Мауле отчетливые аномальные сейсмогравитационные процессы и гравитомангнитные УНЧ возмущения в вариациях магнитного поля Земли проявились за несколько часов до главного удара [Sobisevich et al., 2016]. Анализ сейсмической обстановки был проведен во временном интервале с 04:00 26 февраля 2010 г. до 14:00 28 февраля 2010 г. В этом временном интервале произошли землетрясения и в других сейсмоопасных регионах Земли с магнитудой более 5 (рис. 4).

Анализируя данные наблюдений в Северокавказской геофизической обсерватории в период подготовки и развития землетрясения Мауле, отметим наличие характерных длиннопериодных сейсмогравитационных процессов и сопутствующих УНЧ гравитомангнитных возмущений за четыре часа перед главным ударом. Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о том, что по мере приближения сейсмического удара «вовлеченные» в формирование очага локальные образования горной породы функционируют как своего рода низкочастотные сейсмогравитационные резонаторы с распределенной массой и упругостью, со всеми присущими таким системам закономерностями.

Вывод о колебательном движении больших локальных объемов горной породы в процессе развития анализируемого землетрясения подтверждается данными спутниковых наблюдений [Han et al., 2010], которые показали, что к востоку от эпицентра образовалась обширная гравитационная аномалия (~5 мГал), характерные размеры которой составляли ~500 км. Результаты анализа косейсмических эффектов в очаговой области позволяют предположить, что отрицательное длинноволновое гравитационное возмущение является, в первую очередь, следствием процессов дилатансии – компакции в значительных объемах геологической среды, когда в результате имплозий происходит их трансформация, проявившаяся в поверхностных гравитационных подвижках горной породы. Одновременно получены данные и о положительной гравитационной аномалии в прибрежной зоне Чили [Han et al., 2010; Nikolaevskiy, Sobisevich, 2015].

Зарегистрированные сейсмогравитационные возмущения отражают характер главного удара, структура которого проявилась в наклонах поверхности Земли в районе Северокавказской геофизической обсерватории (рис. 4). В показаниях кварцевого наклономера, установленного в азимуте «восток – запад» (EW), характерные изменения в структуре наклонов выделены во временном интервале 04:00 – 16:00 UT. В этом же интервале отмечены и сопутствующие УНЧ гравитомангнитные возмущения.

В процессе обработки данных обсерваторских наблюдений показания кварцевых наклономеров были профильтрованы в диапазоне 600 с – 10 ч (0.0278–1.7000 мГц). Выделенный при этом сейсмогравитационный процесс отражает медленные длиннопериодные движения гравитирующих отдельностей горной породы в объеме формирующейся очаговой структуры землетрясения Мауле.

Из анализа данных, представленных на рис. 4, следует, что сейсмогравитационный процесс развивался медленно, начиная от 04:00 UT и далее примерно до 22:00 UT, приближаясь постепенно к уровню естественных шумов. И только перед главным ударом удается снова наблюдать отчетливый сейсмогравитационный всплеск.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Отметим, что сегодня формируется отдельное научное направление, в котором основное внимание уделяется изучению информативных длиннопериодных сейсмогравитационных процессов и сопутствующих локальных УНЧ гравитомангнитных возмущений, предшествующих крупным землетрясениям [Sobisevich, 2018; Sobisevich et al., 2019]. Эти данные представляется возможным получать перед крупными сейсмическими событиями. Наиболее отчетливо они выделяются за несколько часов до главного удара (рис. 5).

Анализ морфологических признаков в структуре наблюдаемых волновых форм гравитомангнитных возмущений дает представление и о том, где развивается очаг. Однако в целом задача по выделению района и

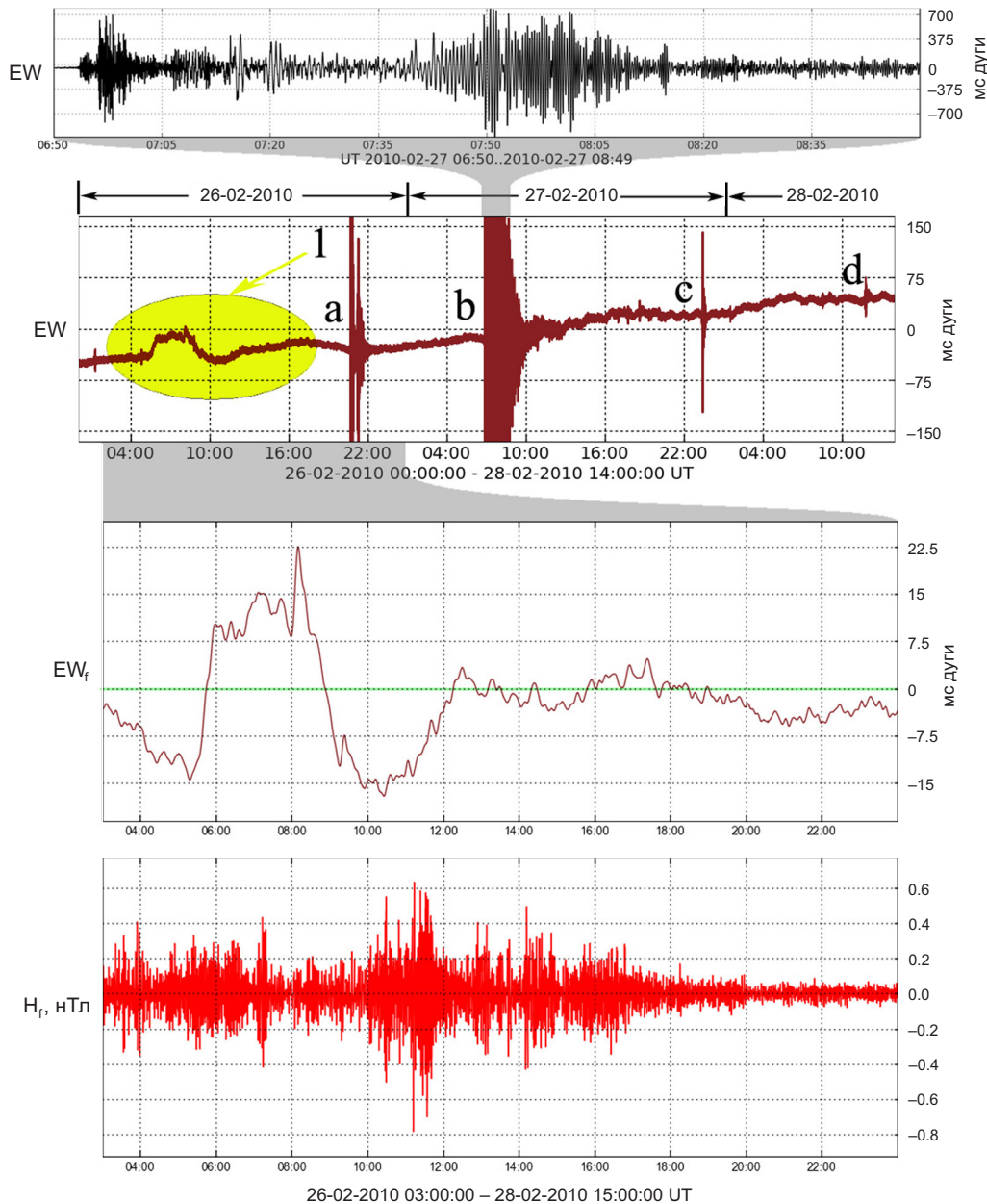


Рис. 4. Результаты наблюдений в геофизической обсерватории ИФЗ РАН. Приведены показания наклономера и магнитного вариометра на этапе подготовки и развития крупных сейсмических событий.

EW – показания наклономера, установленного в азимут «восток – запад»; а – землетрясение в Японии (о. Рюкю, 2010-02-26 20:31:23, 26.04° с.ш., 128.58° в.д., глубина 15 км; $M=7.1$); б – катастрофическое цунамигенное землетрясение у побережья Центрального Чили (2010-02-27 06:34:11, 36.122° ю.ш., 72.898° з.д., глубина 23 км, $M=8.7$); с – Афганское землетрясение (2010-02-27 23:21:11, 35.92° с.ш., 70.13° в.д., глубина 100 км, $M=5.9$); д – землетрясение у побережья Центрального Чили (2010-02-28 11:25:34, 34.76° ю.ш., 71.72° з.д., глубина 33 км, $M=6.1$); H_p , E_p , Z_p – компоненты вариаций магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне 10–300 с. Фрагмент 1 – формирование сейсмогравитационного процесса в ходе подготовки землетрясения Мауле в показаниях кварцевого наклономера EW_f (профильтрованы в диапазоне 600 с – 10 ч (0.0278–1.7000 мГц) и наведенного гравитомангнитного возмущения в показаниях магнитного вариометра H_f (выполнена фильтрация в полосе 3–100 мГц).

Fig. 4. Observation data of the North Caucasus Geophysical Observatory of IPE RAS. The readings of a tiltmeter and a magnetic variometer were taken at the stages of preparation and development of large seismic events.

EW – readings of the tiltmeter installed at the east-west azimuth; а – earthquake in Japan (Ryukyu Island, 2010-02-26 20:31:23, 26.04° N, 128.58° E, 15 km depth; $M=7.1$); б – catastrophic tsunamigenic earthquake at the Central Chile coast (2010-02-27 06:34:11, 36.122° S, 72.898° W, 23 km depth, $M=8.7$); с – Afghan earthquake (2010-02-27 23:21:11, 35.92° N, 70.13° E, 100 km depth, $M=5.9$); д – earthquake at the coast of Central Chile coast (2010-02-28 11:25:34, 34.76° S, 71.72° W, 33 km depth, $M=6.1$); H_p , E_p , Z_p – components of Earth's magnetic field variations (filtered in the range of 10–300 sec.). Fragment 1 – formation of the seismogravitational process during preparation of the Maule earthquake Maule, according to the readings of the quartz tiltmeter (EW_f) (filtered in the range of 600 sec. – 10 hours (0.0278–1.7000 MHz), and induced magnetic gravity perturbations, according to the readings of the magnetic variometer (H_f) (filtered in the band of 3–100 MHz).

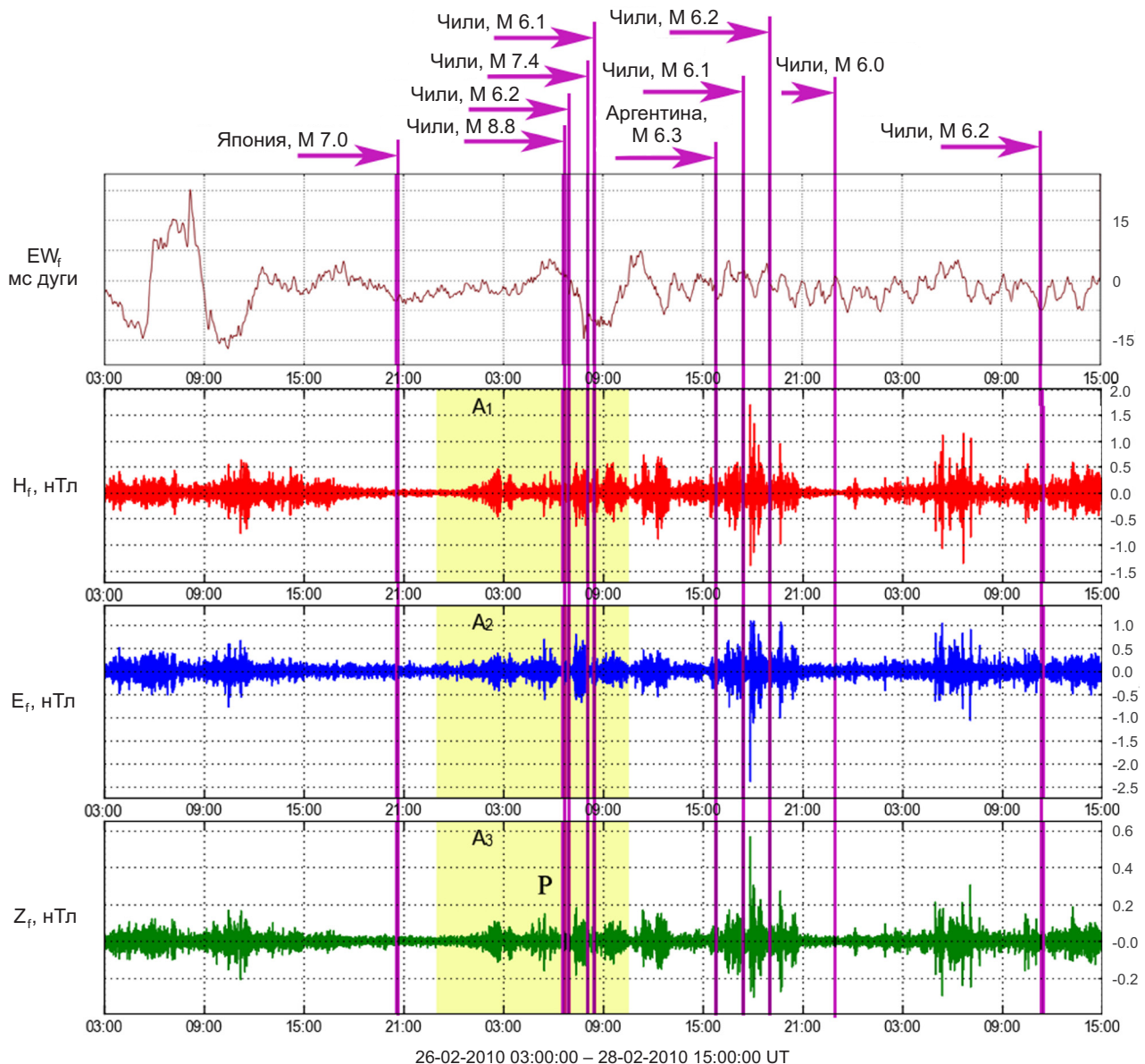


Рис. 5. Результаты наблюдений в Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН. EW_f – сейсмогравитационный процесс в показаниях кварцевого накломера, установленного в азимуте «север – юг». H_f , E_f , Z_f – профильтрованные в полосе 3–100 МГц показания магнитного вариометра.

Fig. 5. Observation data of the North Caucasus Geophysical Observatory of IPE RAS. EW_f – seismogravitational process, according to the readings of the quartz tiltmeter at the north–south azimuth. H_f , E_f , Z_f – readings of the magnetic variometer (filtered in the band of 3–100 MHz).

определению места ожидаемого сейсмического события пока остается не решенной до конца.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных технологиях, связанных с изучением возмущений в геофизических полях Земли в периоды развития сейсмических событий, интерес представляют сейсмогравитационные процессы и сопутствующие гравитоманнитные возмущения. Они открыты в конце XX в., а сегодня уже позволяют на начальном этапе формирования очаговых структур анализировать развитие сейсмических катастроф.

В статье формируется научное направление, в котором основное внимание отводится изучению информативных

длиннопериодных сейсмогравитационных процессов и сопутствующих УНЧ гравитоманнитных возмущений, предшествующих крупным землетрясениям.

Представленный в статье научный материал базируется на данных наблюдений, которые ведутся в лабораториях Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН [Sobisevich, 2013, 2018; Sobisevich et al., 2019].

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ № НШ 5545.2018.5.

7. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Ade P.A.R., Aikin R.W., Barkats D., Benton S.J., Bischoff C.A., Bock J.J., Brevik J.A., Buder I., Bullock E., Dowell C.D., Du-band L., Filippini J.P., Fliescher S., Golwala S.R., Halpern M., Hasselfield M., Hildebrandt S.R., Hilton G.C., Hristov V.V., Irwin K.D., Karkare K.S., Kaufman J.P., Keating B.G., Kernasovskiy S.A., Kovac J.M., Kuo C.L., Leitch E.M., Lueker M., Mason P., Netterfield C.B., Nguyen H.T., O'Brien R., Ogburn R.W., Orlando A., Pryke C., Reintsema C.D., Richter S., Schwarz R., Sheehy C.D., Staniszewski Z.K., Sudiwala R.V., Teply G.P., Tolan J.E., Turner A.D., Viereggs A.G., Wong C.L., Yoon K.W., 2014. Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2. *Physical Review Letters* 112 (24), 241101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.241101>.
- Fraser-Smith A.C., 2008. Ultralow-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 89 (23), 211. <https://doi.org/10.1029/2008EO230007>.
- Gokhberg M.B., Steblou G.M., Shalimov S.L., Veis V.A., Grekhova E.A., 2011. Ionospheric response to submarine earthquake of March 11, 2011, in Japan according to GPS observations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 47 (8), 929–940. <https://doi.org/10.1134/S0001433811080020>.
- Guglielmi A.V., Sobisevich L.E., Sobisevich A.L., Lavrov I.P., 2014. Foreshocks of strong earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50 (4), 501–507. <https://doi.org/10.1134/S1069351314040053>.
- Han S.C., Sauber J., Luthcke S., 2010. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophysical Research Letters* 37 (23), L23307. <https://doi.org/10.1029/2010GL045449>.
- Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Hayakawa M., 2003. Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3 (3–4), 211–215. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-211-2003>.
- Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Voronov P.M., Molchanov O.A., Hayakawa M., 2001. ULF Magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 1 (1–2), 23–31. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-23-2001>.
- Kimura M., Kame N., Watada S., Ohtani M., Araya A., Imanishi Y., Ando M., Kunugi T., 2019. Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan. *Earth Planets Space* 71, 27. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1006-x>.
- Kopytenko Y.A., Matiashvili T.G., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Molchanov O.A., 1993. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 77 (1–2), 85–95. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(93)90035-8).
- Linkov E.M., 1987. *Seismic Phenomena*. Leningrad State University, Leningrad, 248 p. (in Russian) [Линьков Е.М. Сейсмические явления. Л.: ЛГУ, 1987. 248 с.].
- Linkov E.M., Petrova L.N., Osipov K.Ts., 1990. Seismogravitational pulsations of the Earth and atmospheric disturbances as possible precursors of strong earthquakes. *Doklady AN SSSR* 313 (5), 1095–1098 (in Russian) [Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.Ц. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // Доклады АН СССР. 1990. Т. 313. № 5. С. 1095–1098].
- Linkov E.M., Petrova L.N., Savina N.G., Yanovskaya T.B., 1982. Super-long-period oscillations of the Earth. *Doklady AN SSSR* 262 (2), 321–324 (in Russian) [Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Савина Н.Г., Яновская Т.Б. Сверхдлиннопериодные колебания Земли // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 321–324].
- Melnick D., Moreno M., Motagh M., Cisternas M., Wesson R., 2012. Splay fault slip during the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Geology* 40 (3), 251–254. <https://doi.org/10.1130/G34825Y.1>.
- Moore G.W., 1964. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature* 203 (4944), 508–509. <https://doi.org/10.1038/203508b0>.
- Moreno M., Rosenau M., Oncken O., 2010. 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature* 467 (7312), 198–202. <https://doi.org/10.1038/nature09349>.
- Nikolaevskiy V.N., Sobisevich L.E., 2015. The nature of bifocal source of the earthquake and precursors of the blow. *Geofizicheskiy Zhurnal (Geophysical Journal)* 37 (4), 51–74 (in Russian) [Николаевский В.Н., Собисевич Л.Е. Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара // Геофизический журнал. 2015. Т. 37. № 4. С. 51–74]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111125>.
- 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 Science* 42 (6), RS6S90. <https://doi.org/10.1029/2005RS003441>.
- Sobisevich A.L., 2013. *Selected Problems of Mathematical Geophysics, Volcanology and Geoecology. Volume 2. North Caucasus Geophysical Observatory. Creation and Analysis of Observation Results*. IPE RAS, Moscow, 512 p. (in Russian) [Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. М.: ИФЗ РАН, 2013. 512 с.].
- Sobisevich A.L., 2018. Gravimagnetism: results of observatory monitoring. *Doklady Earth Sciences* 480 (2), 783–787. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1806017X>.
- Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Canonidi K.Kh., 2019. ULF Disturbances in Variations of the Earth's Magnetic Field. IPE RAS, Moscow, 223 p. (in Russian) [Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. УНЧ возмущения в вариациях магнитного поля Земли. М.: ИФЗ РАН, 2019. 223 с.].
- Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Kanonidi K.K., Likhodeev D.V., 2017. Gravimagnetic perturbations preceding

earthquakes. *Doklady Earth Sciences* 475 (2), 891–894. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17080086>.

Sobisevich L.E., Starostenko V.I., Rogozhyn E.A., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Kanonidi K.H., Kendzera A.V., Orlyuk M.I., 2016. Abnormal geophysical and seismotectonic processes observed during the period of preparation and development of the earthquake with a magnetude of 8.8 Maule 2010 (Chile). *Geofizicheskiy Zhurnal (Geophysical Journal)* 38 (6), 25–39 (in Russian) [Собисевич Л.Е., Старостенко В.И., Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Канониди К.Х., Кендзера А.В., Орлюк М.И.

Аномальные геофизические и сейсмотектонические процессы, наблюдавшиеся в период подготовки развития землетрясения с магнитудой 8.8 в Мауле 2010 г. (Чили) // *Геофизический журнал*. 2016. Т. 38. № 6. С. 25–39] <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91957>.

Vallée M., Ampuero J.P., Juhel K., Bernard P., Montagner J.P., Barsuglia M., 2017. Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves. *Science* 358 (6367), 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.aao0746>.

ALEXEY L. SOBISEVICH

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia
e-mail: alex@ifz.ru
ORCID: 0000-0003-4656-6694

АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ СОБИСЕВИЧ

чл.-корр. РАН, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, Россия

LEONID E. SOBISEVICH

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia
e-mail: sobis@ifz.ru
ORCID: 0000-0001-7496-0985

ЛЕОНИД ЕВГЕНЬЕВИЧ СОБИСЕВИЧ

докт. техн. наук, профессор, г.н.с.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, Россия

DMITRY V. LIKHODEEV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia
e-mail: dmitry@ifz.ru
ORCID: 0000-0002-3967-6978

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛИХОДЕЕВ

канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, Россия