———— СЕЙСМОЛОГИЯ ——

УДК 550.3+551.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СЕЙСМОГЕННОЙ АКТИВИЗАЦИИ ЧИЛИЙСКОЙ СУБДУКЦИОННОЙ ЗОНЫ В НАЧАЛЕ XXI в.

© 2022 г. И. С. Владимирова^{1,2,*}

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 05.08.2022 г. Поступило 12.08.2022 г. После доработки 01.09.2022 г. Принято к публикации 07.09.2022 г.

Работа посвящена анализу сейсмотектонических деформаций, связанных с сейсмогенной активизацией Чилийской зоны субдукции в начале XXI в. Построены модели очаговых зон трех сильнейших ($M \ge 8$) землетрясений, произошедших в Чилийской зоне субдукции в 2010, 2014 и 2015 г. Проведен сравнительный анализ процессов высвобождения напряжений во время указанных событий. Установлено, что землетрясение Мауле 2010 г. могло способствовать инициации землетрясения Ильяпель 2015 г.

Ключевые слова: сейсмический процесс, Чилийская зона субдукции, сильнейшие землетрясения, сейсмотектонические деформации, очаговая зона, миграция землетрясений **DOI:** 10.31857/S268673972260165X

Островные дуги и активные континентальные окраины, расположенные на периферии Тихого океана, относятся к числу наиболее тектонически и сейсмически активных областей на Земле и служат источником сильнейших катастрофических землетрясений. Разрушительные землетрясения, возникающие в пределах зон субдукции, помимо непосредственно макросейсмических эффектов несут в себе угрозу возникновения волн цунами. Поэтому одной из важнейших задач как геодинамики, так и сейсмологии является исследование особенностей сейсмического процесса именно в субдукционных регионах. При этом необходимым представляется как изучение динамики сейсмического процесса в целом, так и выявление возможной взаимосвязи сильных землетрясений, происходящих на больших расстояниях в пределах одной субдукционной зоны.

Сейсмическая активность в различных сейсмогенных зонах, в том числе и в зонах субдукции, имеет тенденцию к периодическим изменениям во времени. Так, периоды относительного сейсмического покоя, когда уровень сейсмической активности снижается по сравнению со

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова

средним фоном, сменяются периодами повышенной сейсмической активности, когда в том или ином регионе земного шара происходит целая серия сильнейших землетрясений [1]. В начале XXI в. в Чилийской зоне субдукции наблюдалась такая сейсмогенная активизация. За предыдущее десятилетие в центральной и северной частях Чили произошло три сильных цунамигенных землетрясения: землетрясение Мауле 27 февраля 2010 г. (Mw = 8.8), землетрясение Икике 1 апреля 2014 г. (Mw = 8.1) и землетрясение Ильяпель 16 сентября 2015 г. (Mw = 8.3) [2].

В последние годы был опубликован ряд работ, посвященных изучению этих землетрясений ([2–4] и др.), однако большинство подобных исследований направлено на анализ только одного из событий. В данной работе проводится изучение сейсмотектонических деформаций, связанных с серией сильнейших землетрясений в Чили в начале XXI в., на основе комплексного анализа всей совокупности спутниковых геодезических измерений в районе Перуанско-Чилийской зоны субдукции за период 2009–2015 гг. с привлечением сейсмологической информации.

Исследуемые в работе землетрясения характеризуются достаточно близкими магнитудами (8.8, 8.1 и 8.3) и схожим типом механизма, который представляет собой пологий надвиг с падением в сторону континента, что соответствует условиям сжатия, типичным для конвергентной границы литосферных плит. Отметим также, что в пределах очагов исследуемых землетрясений и прежде реа-

Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

^{*}E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru



Рис. 1. Расположение очаговых зон сильнейших землетрясений: 1 — события XX—XXI вв. (красным цветом выделены очаговые зоны землетрясений Мауле 2010 г., Икике 2014 г. и Ильяпель 2015 г.); 2 — предполагаемые длины сейсморазрывов сильнейших исторических землетрясений [2–4].

лизовывались столь же сильные сейсмические события, причем периоды их повторяемости варьируют от 63 до 175 лет [2] (рис. 1).

Для исследования пространственно-временного распределения деформаций земной поверхности, вызванных сейсмогенной активизацией Чилийской субдукционной зоны в начале XXI в., были выполнены обработка и анализ трехкомпонентных временных рядов станций спутниковых геодезических наблюдений на Чилийском побережье, предоставленных Геодезической обсерваторией Невады [5]. Исследование сейсмотектонических деформаций, связанных с сильнейшими землетрясениями Мауле 2010 г., Икике 2014 г. и Ильяпель 2015 г., выполнено в данной работе на основе анализа мгновенных косейсмических смещений и вариаций скоростей смещения 111 станций за годовые интервалы. Все приведенные в работе спутниковые геодезические данные рассматриваются относительно Южно-Американской плиты.

Анализ вариаций скоростей современных движений земной поверхности позволяет выявить особенности геодинамических процессов, связанных с реализацией трех сильнейших землетрясений в Чилийской зоне субдукции в начале XXI в. Обшая сонаправленность векторов смешений вектору конвергенции плит в 2009-2010 гг. (рис. 2 а) указывает на то, что весь рассматриваемый регион пребывает на квазистационарной межсейсмической стадии сейсмического цикла, а близость величин скоростей смещений (30 мм/год на севере и 35-38 мм/год на юге) свидетельствует об относительно равномерном сжатии континентальной окраины непосредственно перед возникновением серии сильнейших землетрясений в 2010-2015 гг. Землетрясение Мауле 27.02.2010 г. спровоцировало возникновение постсейсмических деформаций, скорости которых превысили 300 мм/год в первый год после события (рис. 2 б). Через год величины постсейсмических смещений уменьшились втрое, сохраняя при этом направление в сторону океана (рис. 2 в). В последующие три года продолжилось более плавное уменьшение величин векторов постсейсмических деформаций. Так. спустя два года после землетрясения Мауле максимальные скорости постсейсмических смещений составляли 75-76 мм/год (рис. 2 г), спустя три года они уменьшились до 55 мм/год (рис. 2 д), а спустя четыре года – не превышали 40 мм/год (рис. 2 е). Отметим, что в период между событиями 2010 и 2015 г. постсейсмические деформации развивались в непосредственной близости от области подготовки землетрясения Ильяпель или даже затронули ее южную окраину. На протяжении того же временного интервала поле межсейсмических скоростей, зарегистрированных севернее региона, затронутого землетрясением Мауле, сохраняет относительную стабильность. Событие Икике 2014 г. также вызвало постсейсмические деформации, однако их интенсивность оказалась существенно меньшей в сравнении с таковыми, вызванными землетрясением Мауле 2010 г.: максимальные амплитуды смещений в первый год после события составили 81-83 мм/год (рис. 2 е). В качестве особенности поля скоростей смещений в период 2014-2015 гг. можно отметить рост скоростей межсейсмических смещений на 2-4 мм/год в районе очага готовящегося землетрясения Ильяпель.

С целью изучения особенностей деформационных процессов непосредственно во время землетрясений Мауле 2010 г., Икике 2014 г. и Ильяпель 2015 г. были построены модели их очагов. Для оценки геометрических параметров очаговых областей исследуемых событий выполнена идентификация их афтершоков с использованием кластерного метода [6]. Полученные распределе-



Рис. 2. Скорости смещения станций сети за интервалы: 27.02.2009–26.02.2010 (а); 02.03.2010–01.03.2011(б); 02.03.2011–01.03.2012 (в); 02.03.2012–01.03.2013 (г); 02.03.2013–01.03.2014 (д); 06.04.2014–06.04.2015 (е). Скорости указаны относительно Южно-Американской литосферной плиты.

ния подвижек по разрыву являются результатом решения обратной задачи, сводящейся к минимизации невязок между измеренными спутниковыми методами и смоделированными косейсмическими смещениями:

$$\min_{\mathbf{U}(\mathbf{r}_s)} \sum_{i} \left| \iint_{S} \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) \mathbf{U}(\mathbf{r}_s) dS - \mathbf{u}_{\text{obs}}(\mathbf{r}_i) \right|^2.$$
(1)

Здесь $\mathbf{u}_{obs}(\mathbf{r}_i)$ — измеренные значения косейсмических смещений на наблюдательном пункте в точке \mathbf{r}_i , $\mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)$ — функции отклика среды в точке \mathbf{r}_i на точечную дислокацию в точке \mathbf{r}_s , $\mathbf{U}(\mathbf{r}_s)$ — век-

тор дислокации, распределенный по поверхности сейсморазрыва S. Построение функций отклика $\mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)$ для сферически симметричной слоистой модели Земли осуществляется по методике, описанной в [7], где приведены соотношения для источника дислокации в виде равномерной подвижки по разрыву прямоугольной формы. Искомое распределение подвижки в очаге $\mathbf{U}(\mathbf{r}_s)$ аппроксимируется конечным набором значений по непересекающимся прямоугольным элементам разбиения поверхности S, а на искомый набор значений накладывается условие гладкости. Результирующие распределения подвижки в оча-

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 507 № 2 2022



Рис. 3. Очаговые зоны и эпицентры афтершоков землетрясений Мауле 2010 г. (а), Икике 2014 г. (б), Ильяпель 2015 г. (в), и результаты расчета изменения кулоновских напряжений вследствие землетрясения Мауле 2010 г. (г). Изолиниями показаны величины подвижек в очаговых зонах (в метрах).

гах исследуемых землетрясений представлены на рис. 3 а-в.

Максимальные величины косейсмических смещений, зарегистрированных во время землетрясения Мауле, составили 4.8 м на станциях

вблизи эпицентра землетрясения. Для события 2010 г. отмечается билатеральное развитие сейсморазрыва с образованием двух областей максимальной подвижки, достигшей 12 м, в южной и центральной частях очаговой зоны. В северной части очага также выделяется область значительных смещений порядка 10 м. Землетрясение Мауле сопровождалось длительным и интенсивным афтершоковым процессом, основной особенностью которого стало полное отсутствие афтершоков с $M \ge 7.0$: магнитуда сильнейшего из них составила 6.9 [4]. Заметная особенность развития афтершоковой последовательности состоит в том, что эпицентры повторных толчков окружают области максимальных смещений в очаге. Таким образом, в процессе афтершоковой деятельности, вероятно, происходила релаксация напряжений в тех участках очаговой зоны, где они остались высоки после землетрясения.

Двумя часами позже основного толчка в 300 км от эпицентра землетрясения Мауле произошло событие с Mw = 7.4, характеризующееся сбросовым механизмом (рис. 3 а). Это событие, вероятно, было инициировано быстрым нарастанием растягивающих напряжений в краевом океаническом валу сразу после землетрясения Мауле.

Мгновенные косейсмические смещения пунктов наблюдений во время землетрясения Икике не достигли и 0.8 м (рис. 3 б), что может объясняться меньшей магнитудой события в сравнении с землетрясением 2010 г. Отличительной особенностью события 2014 г. является преимущественно однонаправленное распространение разрыва, длина которого составила менее 200 км вместо ожидаемых 600 км [3]. При этом как область значимых смещений в очаге землетрясения, достигших 6 м, так и эпицентры афтершоков сосредоточены преимущественно к югу от главного толчка. Количество повторных толчков, зарегистрированных после этого события, было достаточно невелико. Наблюдающийся недостаток афтершоков может свидетельствовать об асейсмическом крипе в условиях гетерогенного межплитового сцепления [8]. Иными словами, непосредственно во время землетрясения разрывные нарушения затронули только часть предполагаемой очаговой зоны, в то время как неразрушенные участки сместились асейсмически, что может объяснить неожиданно малую протяженность сейсмического очага.

Величины косейсмических смещений, зарегистрированных во время третьего события, — землетрясения Ильяпель 2015 г. достигли 2.2 м вблизи эпицентра. Итоговое разрывное нарушение образовалось в результате двустороннего развития сейсморазрыва вдоль Перуанско-Чилийского желоба. Длина зоны, в которой произошли значимые сейсмические смещения, составила 250 км, а величина максимальных смещений в очаге достигла 6 м. Большая часть повторных толчков произошла за пределами области максимальных смещений в очаге (рис. 3 в), как и в случае землетрясения Мауле, что позволяет говорить о некотором сходстве процессов высвобождения остаточных напряжений после сильных землетрясений в центральной части Чилийской зоны субдукции.

Тот факт, что три сильнейших события произошли в пределах одной субдукционной зоны в течение всего лишь шестилетнего временного интервала, позволяет исследовать масштабность и внутреннюю связность сейсмического процесса. В работах ([9-13] и др.) были даны утвердительные ответы на вопросы о наличии взаимосвязей сильных землетрясений, происходящих на больших расстояниях, и о возможности инициирования одних событий другими. Миграцию эпицентров землетрясений в различных сейсмоактивных регионах связывают с передачей деформаций внутри Земли посредством распространения волновых деформационных процессов с различными скоростями [9, 10]. В работе [11] была получена оценка скорости распространения деформационных волн вдоль субдукционных зон и, соответственно, скорости миграции сильных землетрясений по простиранию зоны субдукции, состакм/год. Расстояния между вившая 50 - 170гипоцентрами событий Мауле-Икике и Икике-Ильяпель составляют около 1800 и 1300 км соответственно. В таком случае скорость распространения деформационной волны вдоль Чилийской зоны субдукции должна составлять 430-860 км/год, что в несколько раз превышает полученные в [11] оценки. В то же время расстояние между гипоцентрами землетрясений Мауле 2010 г. и Ильяпель 2015 г. составило менее 550 км. Для того, чтобы преодолеть такую дистанцию за 5.5 лет, деформационная волна должна распространяться со средней скоростью около 100 км/год, что хорошо согласуется с оценками из [11]. Таким образом, наблюдаемый процесс миграции землетрясений в Чилийской зоне субдукции может быть обусловлен распространением тектонических напряжений, вызывающих дополнительную нагрузку в сегментах субдукционной зоны с высокой концентрацией упругих напряжений.

Было также установлено, что удаленные сильные землетрясения могут оказывать решающее влияние на заключительном этапе формирования очага другого события [12]. При этом следующее сейсмическое событие произойдет лишь там, где состояние среды уже близко к разрушению, и перепад напряжений, вызванный уже произошедшим событием, послужит спусковым механизмом. В работе [13] было показано, что землетрясения с $M \ge 8$ могут оказывать влияние на ход сейсмичности в радиусе 1000 км. Расстояния между гипоцентрами событий Мауле-Икике и Икике–Ильяпель 1800 и 1300 км сильно превышают указанный радиус, в то время как расстояние между гипоцентрами землетрясений Мауле-Ильяпель составляет всего 550 км, а это значит, что область формирования очага землетрясения Ильяпель попадает в область влияния землетрясения Мауле.

Согласно результатам экспериментов по деформированию горных пород, геосреда является кулоновской средой, т.е. хрупкой средой с внутренним трением [14]. Для таких сред близость к критическому состоянию, за которым следует хрупкое разрушение, определяется кулоновскими напряжениями, представляющими собой разность между касательными напряжениями на поверхности разрыва и напряжением сухого трения [15].

Оценка возможного влияния Чилийских землетрясений на ускорение процесса подготовки следующего сильного землетрясения проводилась посредством расчета изменения кулоновских напряжений в плоскостях очагов будущих землетрясений в результате реализации предыдущего землетрясения:

$$\Delta \sigma_f = \Delta \tau_B - \mu' (\Delta \sigma_B), \qquad (2)$$

где $\Delta \tau_B$ и $\Delta \sigma_B$ – изменение касательных и нормальных напряжений в плоскости очага будущего землетрясения; $\mu' = \mu(1 - B) - эффективный ко$ эффициент трения; µ – коэффициент трения, $B \in [0,1]$ – коэффициент Скемптона. Расчет кулоновских напряжений в работе проводился с использованием пакета Coulomb 3. В результате проведенных расчетов не выявлено явной взаимосвязи между землетрясениями Мауле-Икике и Икике–Ильяпель. В то же время показано, что в результате землетрясения Мауле произошел перенос кулоновских напряжений в область очага будущего землетрясения Ильяпель (рис. 3 г), что могло приблизить момент возникновения хрупких разрушений в этой зоне. Таким образом, событие 2010 г. потенциально могло способствовать инициации события 2015 г.

Все рассмотренные выше сильнейшие субдукционные землетрясения произошли в течение краткого временного интервала в пределах одной сейсмогенной зоны, связанной единством тектонических условий. Однако проведенный сравнительный анализ позволил выявить ряд существенных отличий развития деформационных процессов в окрестностях их очагов. Эти различия, предположительно, определяются уникальными тектоническими и геологическими условиями, присушими очаговой зоне конкретного события. Для выявления индивидуальных особенностей формирования очагов и релаксации остаточных напряжений после землетрясений в дальнейшем представляется целесообразным моделирование геодинамических процессов, протекающих в окрестности очаговых зон в предсейсмический и постсейсмический периоды.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 20-17-00140.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балакина Л.М., Москвина А.Г. Андаман-Суматринская островная дуга. І. Особенности пространственно-временного проявления землетрясений и механизмы их очагов // Физика Земли. 2012. № 2. С. 27–66.
- Ruiz S.A., Madariaga R. Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile // Tectonophysics. 2018. V. 733. P. 37–56.
- 3. Lay T., Yue H., Brodsky E.E., An C. The 1 April 2014 Iquique, Chile, Mw 8.1 earthquake rupture sequence // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 3818–3825.
- 4. *Mora-Stock C., Rabbel W.* Maule Mw 8.8 earthquake: a seismological review // The Chilean Earthquake and Tsunami 2010. A Multidisciplinary Study of Mw 8.8, Maule. Boston: WIT PRESS, 2013. P. 1–24.
- 5. *Blewitt G.W., Hammond C., Kreemer C.* Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // EOS 99. 2018. https://doi.org/10.1029/2018EO104623
- 6. Смирнов В.Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. І. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- 7. *Pollitz F.F.* Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 1–14.
- Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Баранов С.В., Михайлов В.О. Дефицит сильных афтершоков как индикатор постсейсмического проскальзывания в очагах землетрясений зон субдукции // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 1. С. 81–85.
- 9. Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754.
- Викулин А.В., Водинчар Г.М., Гусяков В.К., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Долгая А.А., Осипова Н.А. Миграция сейсмической и вулканической активности в зонах напряженного состояния вещества наиболее геодинамически активных мегаструктур Земли // Вестник КамчатГТУ. 2011. Вып. 17. С. 5–15.
- 11. *Anderson D.L.* Accelerated plate tectonics // Science. 1975. V. 187. № 4181. P. 1077–1079.
- 12. *Николаев А.В., Верещагина Г.М.* Об инициировании землетрясений землетрясениями // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318. № 2. С. 320–324.
- Кальметьева З.А., Юдахин Ф.Н. Взаимосвязь сильных землетрясений Высокой Азии // ДАН. 1994. Т. 335. № 2. С. 225–231.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 1. С. 25–37.
- Райс Дж. Механика очага землетрясения. М: Мир, 1982. 217 с.

STUDY OF THE FEATURES OF SEISMOGENIC ACTIVATION OF THE CHILEAN SUBDUCTION ZONE AT THE BEGINNING OF THE XXI CENTURY

I. S. Vladimirova^{*a,b,#*}

^aShirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation ^bMoscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russian Federation [#]E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovsky August 05, 2022

The work is devoted to the analysis of seismotectonic deformations associated with the seismogenic activation of the Chilean subduction zone at the beginning of the 21st century. The constructed models of source zones of three strongest ($M \ge 8$) earthquakes that occurred in the Chilean subduction zone in 2010, 2014, and 2015 are presented. A comparative analysis of stress release processes during these events was carried out. It has been established that the 2010 Maule earthquake could have contributed to the initiation of the 2015 Illapel earthquake.

Keywords: seismic process, Chilean subduction zone, strongest earthquakes, seismotectonic deformations, source zone, migration of earthquakes