

УДК 551.24, 551.243, 550.342

РЕГИСТРАЦИЯ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН ПО ДАННЫМ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

© 2022 г. В. И. Кафтан^{1,*}, В. Н. Татарин^{1,2}

Представлено академиком РАН А.Д. Гвишиани 22.03.2022 г.

Поступило 22.03.2022 г.

После доработки 07.04.2022 г.

Принято к публикации 07.04.2022 г.

Представлены первые результаты экспериментальной регистрации медленных деформационных волн в земной коре в связи с ходом сейсмичности на границе взаимодействия тектонических плит. Исходными данными послужили временные ряды изменения координат станций непрерывных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС)-наблюдений, каталоги землетрясений и цифровые карты разломной тектоники региона. В работе использована разработанная авторами стратегия создания кинематических визуализаций сейсмодеформационного процесса. Эвристический анализ полученных видеоизображений позволил обнаружить явления медленной миграции деформаций земной коры – деформационные волны в связи с сейсмическим процессом и подготовкой сильных землетрясений на временных интервалах продолжительностью от 11 до 15 лет.

Ключевые слова: деформации, землетрясения, деформационные волны, сейсмический процесс, ГНСС

DOI: 10.31857/S268673972207009X

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в связи с интенсивным развитием и распространением средств глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) имеется и реализуется возможность мониторинга различных геодинамических процессов. Увеличивается число группировок спутников ГНСС, создаваемых и поддерживаемых разными государствами. Растет количество наземных станций непрерывных ГНСС-наблюдений, полноценно функционирующих на интервалах от первых лет до десятилетий. Осуществляется прямая регистрация пространственно-временных изменений положения наблюдательных станций, которые, в свою очередь, представляют основу для вычисления деформаций верхов земной коры.

Указанные обстоятельства обеспечивают возможность экспериментального выявления и изучения таких геодинамических явлений, как медленные деформационные волны. Настоящая работа посвящена представлению и анализу результатов ГНСС-наблюдений за медленными деформаци-

онными волнами и их связи с ходом сейсмической активности.

ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ И НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Гипотеза распространения медленных волновых деформационных процессов в земной коре имеет более чем полувековую историю. Попытку их первых теоретических описаний Ю.О. Кузьмин [6] связывает с моделью (механизмом) Эльзассера [11]. Началом формирования соответствующей волновой концепции считают работу Рихтера [16], в которой было обращено внимание на миграцию эпицентров землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома на протяжении около двух десятилетий. При этом следует отметить, что первое упоминание упорядоченного в пространстве и времени распределения эпицентров землетрясений было дано в работе [3]. Явления миграции землетрясений в научных кругах обсуждалось неоднократно [2, 6, 7, 14].

Попытки инструментальных доказательств феномена медленных волн деформации земной коры представлены в ряде работ на основе мониторинга, не редко, различных по своей природе процессов. Наблюдаемая миграция сейсмичности и косвенных оценок деформации по различным геофизическим характеристикам связывается с волновой природой в работах [8, 9]. Регистрация мигра-

¹Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт физики Земли Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: v.kaftan@gcras.ru

ции деформаций по данным экстензометрических измерений представлена в работе [1]. Волновые процессы, выявленные по данным геодезических измерений, описаны в работе [5]. При этом изучено поведение вертикальных движений земной поверхности в разломных зонах.

Попытка связи миграции эпицентров слабых землетрясений с нарушениями сезонных колебаний в изменениях координат временных рядов некоторых пунктов региональной сети ГНСС-наблюдений представлена в работах [1, 8].

Сложившиеся представления о механизме наблюдаемой миграции эпицентров землетрясений и геофизических проявлений не позволяют предложить единую и непротиворечивую модель малоизученного процесса. Наиболее убедительным теоретическим описанием, сегодня, является автоволновая модель механизма миграции деформационных характеристик [6]. Автор рассматривает два типа медленных деформационных волн: “межразломные” и “внутриразломные”. Для межразломных типов изучаемого процесса единственно возможным объяснением на сегодняшний день, автором признается модель автоволновой миграции деформационной активности. В описании автоволновых процессов рассматриваются режимы состояния активной среды: автоколебательный, возбудимый режим и режим триггера. В последнем варианте в активной среде инициируется и распространяется волна возбуждения. Одним из выводов автора анализа современного состояния проблемы [6] является утверждение, что “имеющаяся к настоящему времени эмпирическая информация о пространственно-временной миграции деформационных процессов (медленных деформационных волн) не способна объяснить весь спектр наблюдаемых движений земной поверхности различных масштабов”. Это обусловлено отсутствием достаточно плотных и продолжительно функционирующих наблюдательных сетей. Особое место при этом отводится сетям непрерывных ГНСС-наблюдений за движениями и деформациями земной поверхности.

Ниже нами представлены новые экспериментальные доказательства существования медленных деформационных волн в районе высокой сейсмической активности.

ИНИЦИИРОВАННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Стратегия исследования. Сегодня на территории Земного шара функционирует порядка двадцати тысяч постояннодействующих станций ГНСС, наблюдения на которых продолжаются вплоть до первых десятков лет. В открытом доступе предоставляются временные ряды точных (сантиметровая точность) координат наблюда-

тельных пунктов, полученных по суточным непрерывным наблюдениям [10]. Координаты временных рядов пунктов ГНСС получены по стратегии PPP (Precise Point Positioning) с использованием высокоточной продукции Международной службы ГНСС (International GNSS Service) с опорой на глобальную геодезическую основу ITRF2014. Эти современные достижения позволили нам зарегистрировать волновые деформационные процессы в одном из сейсмоактивных районов Земли.

Областью исследований было выбрано западное побережье Северной Америки. При этом изначально предполагался поиск деформационных предвестников сильных землетрясений, сосредоточенный главным образом в эпицентральных зонах уже свершившихся сильных сейсмических событий, перед возникновением которых были накоплены годы и десятилетия непрерывных ГНСС-наблюдений [12, 13].

С этой целью по изменениям плановых координат u_n и u_e (оси n и e направлены на север и восток) вычислялись компоненты тензора горизонтальной деформации

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix},$$

элементы которого $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$, $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$ и $\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right)$, соответственно, где $\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}$ – относительный сдвиг.

Элементы тензора деформации являются частными производными смещений u_n и u_e по осям координат n и e .

Ввиду того, что наблюдательные сети и эпицентры сильных землетрясений были расположены на активной границе Северо-Американской и Тихоокеанской тектонических плит, где преобладают деформации сдвига по простиранию сейсмогенерирующих разломов, нами рассчитывались и подвергались анализу деформации полного сдвига $\gamma = ((\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2)^{1/2}$.

Компоненты деформаций вычислялись согласно методу, описанному в [17].

Цифровые модели накопленных от начального цикла деформаций полного сдвига на каждые сутки наблюдений формировали изображения кадров специальной кинематической анимации – видеофайла, демонстрирующего ход деформационного процесса в пространстве и времени в связи с ходом сейсмической активности и характером разломной тектоники района.

Данные о сейсмичности получали из каталога землетрясений Национального центра сейсмического мониторинга США (National Earthquake Information Center – NEIC).

Местоположения активных разломов, изображаемых на кадрах, были получены с цифровой карты геопортала Геологической службы США [<http://usgs.maps.arcgis.com/home/>].

Полученные кинематические визуализации данных обеспечили прямые наблюдения за сейсмодиформационным процессом и их эвристический анализ. Соответствующие видео-анимации размещены на научном информационном ресурсе Research Gate. Прямые ссылки на расположение синоптических анимаций даны ниже в соответствующих разделах статьи.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Внутриразломная деформационная волна в районе сейсмоактивной зоны Паркфилд. Особый интерес для изучения процесса подготовки сильного землетрясения представляет собой сейсмоактивная зона Паркфилд (США), где с убедительной регулярностью порядка 20–30 лет повторяются землетрясения с магнитудой $M \geq 6$ [15]. Это обстоятельство сегодня позволяет средствами непрерывных ГНСС-наблюдений регистрировать деформации земной коры на протяжении полного сейсмического цикла. Основным активным тектоническим элементом в этом районе является разломная зона Сан-Андреас. По описанной выше стратегии получена кинематическая визуализация сейсмодиформационного процесса для интервала с 01 января 2006 г. по 23 декабря 2020 г. (<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10619.39205>). Отдельные кадры развития сейсмодиформационного процесса представлены на рис. 1.

Зарождение деформационной волны представлено на рис. 1а. Оно по времени и по месту совпадает с возникновением слабого землетрясения $M_w = 3$, которое запускает деформационную волну. Распространение волнового фронта (рис. 1б–и) протекает вдоль разлома Сан-Андреас в противоположных направлениях с преимуществом на юго-восток со средней скоростью 2 км/год. Волна обнаруживается примерно через 8 мес после начала наблюдений за деформациями. В центре участка разломной зоны Сан-Андреас, там, где в 2004 г. произошло последнее сильное землетрясение, накопление деформаций не происходит.

“Внутриразломная” деформационная волна возбуждения землетрясения Напа 2014 г. Поиск предвестников землетрясения Напа (24 августа 2014 г., $M_w = 6$, США, Калифорния) позволил обнаружить деформационную волну сдвига, послужившую триггером этого землетрясения. При анализе деформационных неоднородностей, предшествующих землетрясению Напа, была обнаружена область накопления аномально высоких сдвиговых деформаций в десятках километров к юго-востоку от эпицентра главного события. Максимум

сдвиговой деформации оказался почти в сотне километров к юго-востоку от землетрясения Напа. Построенная кинематическая визуализация [13] с временным разрешением в трое суток продемонстрировала интересный сейсмодиформационный процесс. На принципиально важных кадрах видео-анимации (рис. 2) можно проследить эволюцию деформационной волны в связи с протекающей сейсмической активностью на интервале от 16 января 2006 г. до 11 января 2017 г. Первые кадры (рис. 2 а, б) показывают, что место возникновения деформационной волны сдвига совпадает с эпицентрами пары умеренных землетрясений $M_w > 5$ на разломе Калаверас. На протяжении года волна распространялась симметрично на юго-восток и северо-запад согласованно с увеличением числа слабых толчков в зоне ее охвата (рис. 2 в). Позже стало преобладать направление перемещения фронта волны на северо-запад (рис. 2 г, д) вдоль разлома Хайвард, где предсказывается возможность возникновения разрушительного землетрясения (HayWired Scenario). Переход волны на соседний разлом Напа представлен на рис. 2 г, д.

Разрядка землетрясения Напа 2014 г. показана на рис. 2 е. На рис. 2 ж, з продемонстрировано продолжение распространения волны после главного события на северо-запад, где в итоге в окрестностях вулканического поля Clear Lake происходит умеренное землетрясение с $M_w = 5$.

Двумерная концентрическая автоволна перед землетрясением Риджкрест. Аналогичный анализ эволюции сейсмодиформационного процесса осуществлен в связи с землетрясением Риджкрест (июль 2019 г., США, Калифорния), $M_w = 7.1$. За период с 19 июля 2006 г. по 02 августа 2019 г. была построена кинематическая визуализация сейсмодиформационного процесса (<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11595.41767>). Временное разрешение видео-анимации составляло 3 сут. Ключевые кадры визуализации представлены на рис. 3.

Примечательно то, что примерно за два года до обнаружения роста аномальных деформаций полного сдвига в двух десятках километров севернее экстремума произошло умеренное землетрясение с $M_w = 5$ (рис. 3а). В связи с этим следует заметить, что в данном районе сравнительно невысока густота пунктов наблюдательной сети, что может отражаться на точности фиксации положения экстремума деформации, получаемого интерполяцией. Начало развития деформационной волны совпадает с северной частью вулканического поля Косо, в области которого наблюдается рост слабой сейсмичности (рис. 3а–е). От данного места, примерно с севера на юг, к эпицентру будущего главного сильного толчка протягивается цепочка слабых событий, в дальнейшем коли-

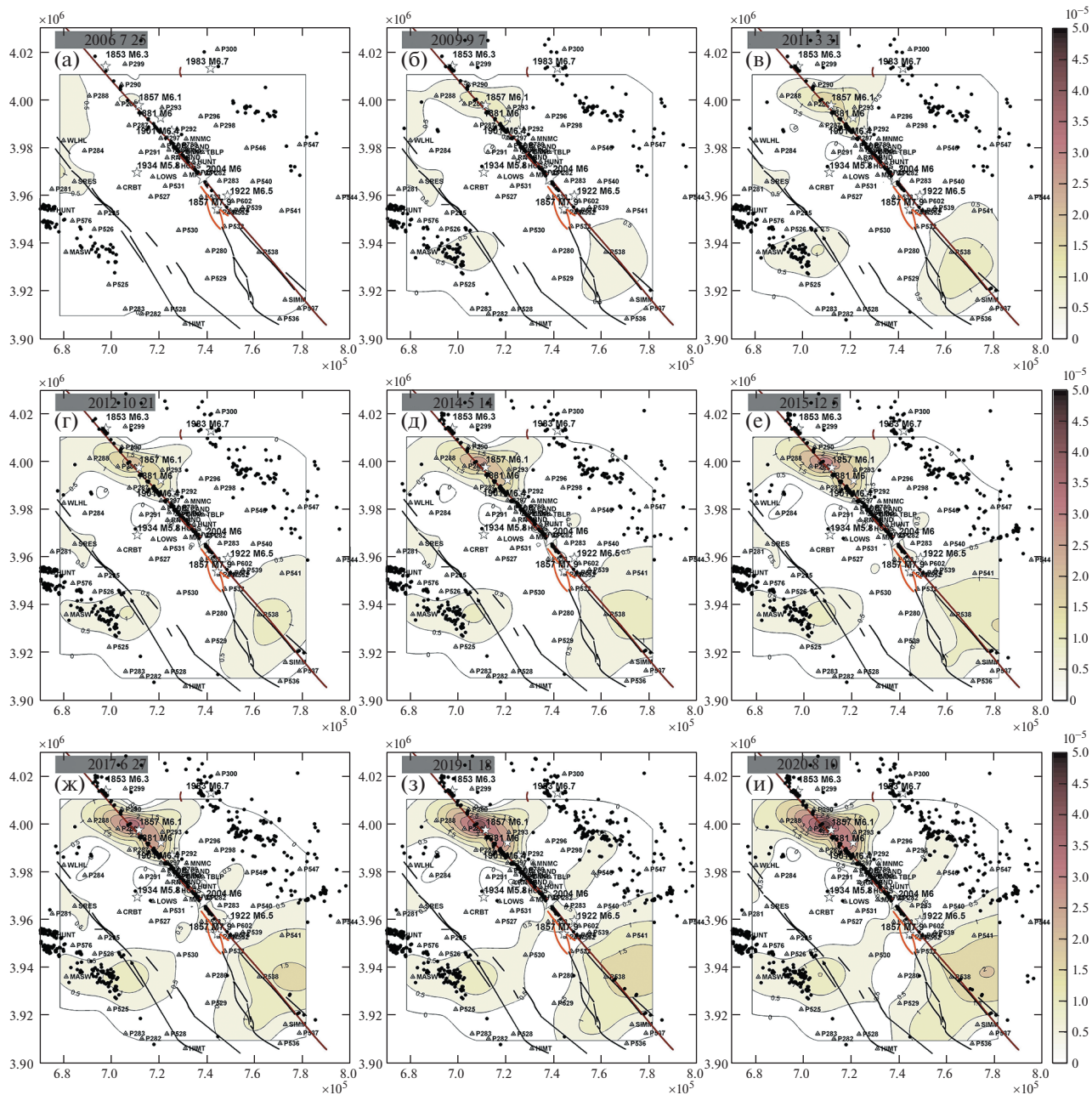


Рис. 1. Эволюция сейсмодформационного процесса в сейсмоактивной зоне Паркфилд. Интервал между кадрами составляет 3 сут. Треугольники – пункты GPS. Звезды – эпицентры исторических землетрясений с $M_w > 5.8$. Черные окружности – эпицентры текущих землетрясений $3 < M_w < 5$. Коричневая линия – разломная зона Сан Андреас. Черные и желтые линии – второстепенные разломы. Интервал между изолиниями деформаций – 5×10^{-6} . Координаты на рамке кадров даны в проекции UTM.

чественно увеличившаяся за счет афтершоков сильных событий (рис. 3ж–и). Область роста деформационной волны не является вытянутой. Она в значительной степени круговая, что можно объяснить отсутствием в этом месте генерального разлома (линейного волновода), как в двух рассмотренных выше случаях. В центре этой зоны, на мелкомасштабном изображении (рис. 3), по-

казанной точечным условным знаком вулкана, имеется высокая раздробленность земной коры, на что указывает также рой слабых землетрясений (рис. 3б–и). Квази-концентрическое распространение деформационной волны захватило соседние разломы, расположенные восточнее (рис. 3г–ж). Кадры (рис. 3ж–и) демонстрируют генетическую связь между деформационной волной и сильней-

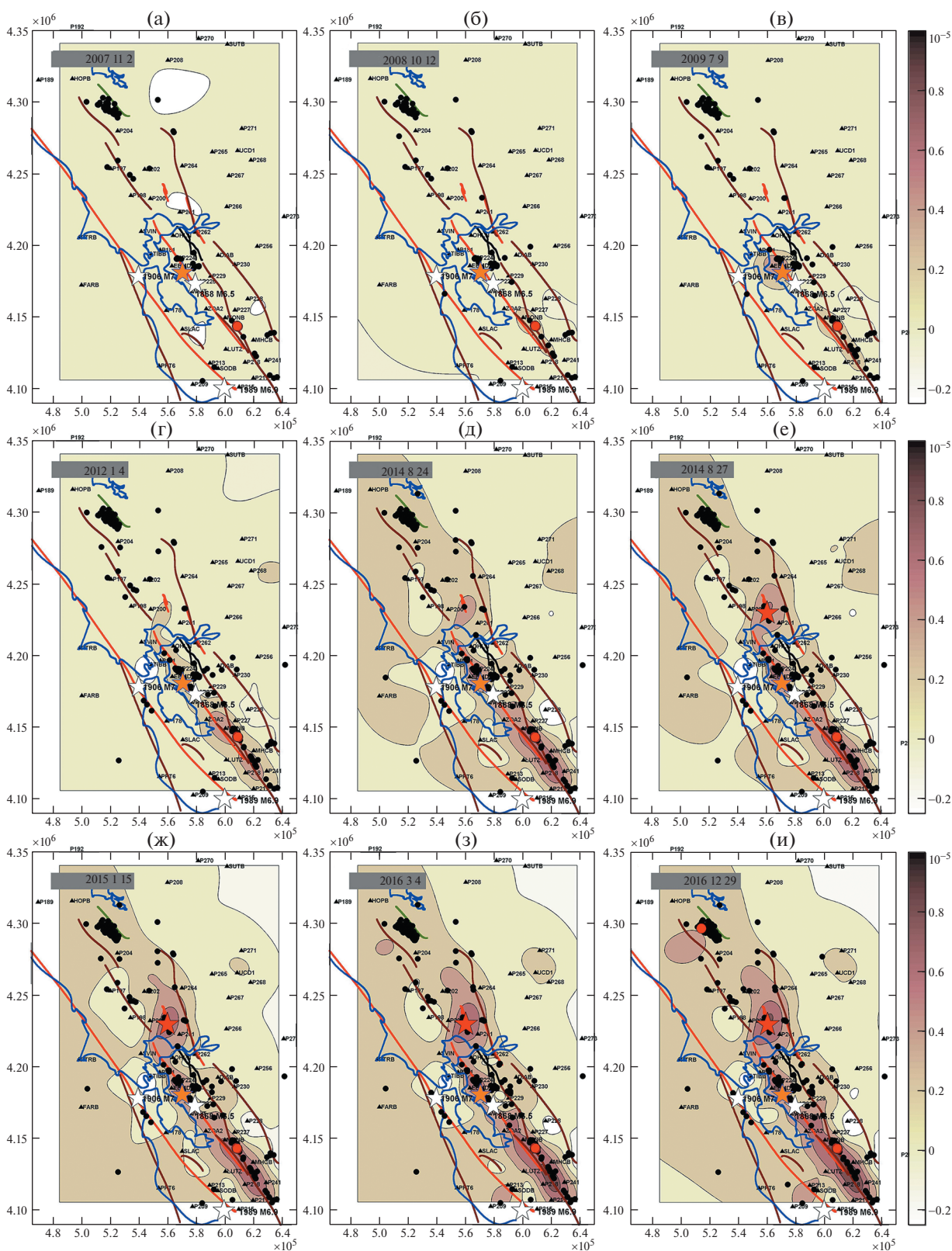


Рис. 2. Распределение деформации полного сдвига перед землетрясением Гаити 2014 г. Сечение изолиний деформации 2×10^{-6} . Разломы здесь и на рис. 3: красные линии – современные сейсморазрывы возрастом менее 150 лет; коричневые – позднечетвертичные разломы моложе 15 000 лет; черные – четвертичные разломы. Белые звезды – исторические сильные землетрясения. Оранжевая звезда – место ожидания разрушительного землетрясения по сценарию HayWired. Красная звезда – эпицентр землетрясения Гаити 2014 г. Черные окружности – эпицентры слабых землетрясений с $M < 5$.

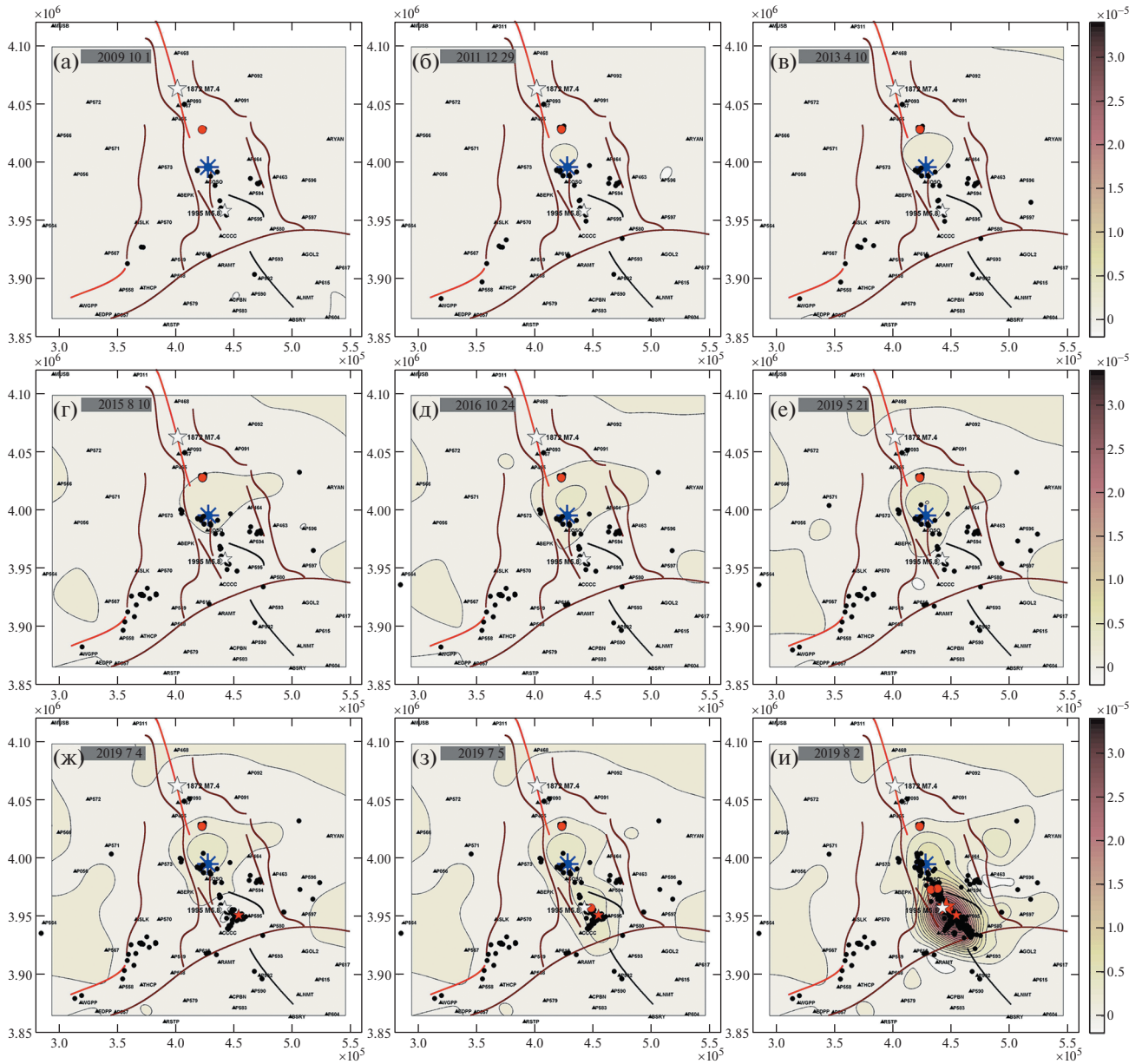


Рис. 3. Деформации полного сдвига перед землетрясениями Риджкрест 2019 г. Звезды: белые – исторические сильные землетрясения, красные – эпицентр землетрясений Риджкрест 2019 г. Красные окружности – умеренные землетрясения. Черные точки – эпицентры слабых землетрясений с $M < 5$. Синяя звезда – вулканическое поле Косо.

шими сейсмическими событиями. Это дает основания предполагать ее триггерное воздействие на готовые к разрядке сейсмической энергии очаги серии сильных событий Риджкрест 2019 г.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ опубликованных работ позволяет говорить о том, что сегодня теоретические исследования значительно опережают экспериментальную регистрацию феномена деформационных волн. В связи с этим представленные результаты

имеют существенный научный интерес как первые доказательства существования деформационных волн в связи с ходом сейсмического процесса.

Сравнение характеристик обнаруженных деформационных волн представлено в табл. 1.

Результаты показывают, что скорости движения и значения деформации волнового фронта не значительно отличаются друг от друга по порядку их величин.

Проведенные исследования сейсмореформационного процесса в районе контакта Тихооке-

Таблица 1. Характеристики выявленных деформационных волн

Землетрясение, год	Магнитуда, M_w	Глубина, км	Спусковая деформация	Скорость распространения, км/год	Косейсмический полный сдвиг
Напа, 2014	6.01	11	0.27×10^{-5}	20	1.5×10^{-5}
Риджкрест, 2019	6.4 и 7.1	11 и 8	0.18×10^{-5}	7	3×10^{-5}
Паркфилд, 2022?*	>5.9	?	?	2	?

* – указано возможное прогнозируемое землетрясение в районе Паркфилд в интервале 2022–2029 гг.

анской и Северо-Американской тектонических плит продемонстрировали возможность регистрации деформационных волн и их взаимосвязь с сейсмическими событиями на основе обработки сетей непрерывных и долговременных ГНСС-наблюдений.

Развитие деформационной волны в пространстве и времени обнаруживается при наблюдении за сейсмодеформационным процессом на его кинематических визуализациях. Эвристический анализ кинематических визуализаций позволяет выдвигать предположения о механизме наблюдаемых геодинамических явлений.

Совокупность полученных результатов позволяет предполагать следующие условия возникновения и распространения деформационных волн:

– главной действующей силой, обуславливающей региональный и локальный сейсмо-деформационный процесс, является динамика взаимодействия контактирующих глобальных тектонических плит;

– характер деформационных волн зависит от пространственного распределения областей сцепления активных тектонических разломов и их структуры.

Последнее условие объясняет форму и скорость распространения деформационной волны. Оно в будущем может объяснить различие в скоростях и амплитудах деформационных волн, инициирующих сейсмическое событие определенной силы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борняков С.А., Салко Д.В., Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Ганзориг Д., Батсайхан Ц., Тогтохбаяр С. Инструментальная регистрация медленных деформационных волн на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // ДАН. 2017. Т. 473. № 3. С. 355–358.
2. Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. 9 (3). С. 721–754. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0369>
3. Васильковский Н.П., Репников М.П. Тектоника и сейсмичность северо-восточной части Ташкентского района // Ташкент: Изд. УзФАН. 1940. 127 с.
4. Кафтан В.И., Мельников А.Ю. Выявление деформационных аномалий по данным ГНСС наблюдений в связи с подготовкой и разрядкой крупных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 26–36. <https://doi.org/10.7868/S0002333718010027>
5. Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3–19.
6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 172–182. <https://doi.org/10.31857/S0002333720040055>
7. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 132 с.
8. Трофименко С.В., Быков В.Г., Гриб Н.Н. Проявления медленных деформационных волн в сейсмическом режиме и геофизических полях северной окраины Амурской плиты // Геодинамика и тектонофизика. 2018. 9 (2). С. 413–426. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0353>
9. Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. 4 (2). С. 83–117. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093>
10. Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science // Eos. 2018. 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>
11. Elsasser W.H. Convection and Stress Propagation in the Upper Mantle // Appl. Modern Phys. Earth Planet. Inter. N.Y.: Wiley. 1969. P. 223–246.
12. Kaftan V., Melnikov A. Local Deformation Precursors of Large Earthquakes Derived from GNSS Observation Data // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 2017. 95(3):032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032030>.
13. Kaftan V., Melnikov A. Migration of Earth Surface Deformation as a Large Earthquake Trigger / In: Kocharyan G., Lyakhov A. (eds) Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2019. P. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_8.

14. *Kasahara K.* Migration of Crustal Deformation // *Tectonophysics*. 1979. V. 72. P. 329–341.
15. *Lienkaemper J.J., Baker B., McFarland F.S.* Surface Slip Associated with the 2004 Parkfield, California, Earthquake Measured on Alinement Arrays // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. 96 (4B). S239.
<https://doi.org/10.1785/0120050806>
16. *Richter E.F.*, 1958. *Elementary Seismology*. W.H. Freeman, San Francisco, 768 p.
17. *Wu J.C., Tang H.W., Chen Y.Q., Li Y.X.*, The Current Strain Distribution in the North China Basin of Eastern China by Least-squares Collocation // *Journal of Geodynamics*. 2006. V. 41. P. 462–470.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.01.003>

REGISTRATION OF SLOW DEFORMATION WAVES ACCORDING TO GNSS OBSERVATIONS

V. I. Kaftan^{a,#} and V. N. Tatarinov^{a,b}

^a*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: v.kaftan@gcras.ru*

Presented by Academician of the RAS A.D. Gvishiani March 22, 2022

The first results of experimental registration of slow deformation waves in the earth's crust in connection with the evolution of seismicity at the interface between tectonic plates are presented. The initial data were the time series of changes in the coordinates of continuous GNSS observation stations, earthquake catalogs and digital maps of the fault tectonics of the region. The paper uses the strategy developed by the authors for creating kinematic visualizations of the seismic-deformation process. Heuristic analysis of the obtained video images made it possible to detect the phenomena of slow migration of deformations of the earth's crust – deformation waves due to the seismic process and the preparation of strong earthquakes at time intervals of 11 to 15 years.

Keywords: deformations, earthquakes, deformation waves, seismic process, GNSS