

УДК 528+550.3+551.24

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ТРИНАДЦАТИЛЕТНИМ GPS-НАБЛЮДЕНИЯМ ДО И ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РИДЖКРЕСТ (ИЮЛЬ 2019, США, КАЛИФОРНИЯ)

© 2021 г. В. И. Кафтан*

Геофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119269 Россия

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

Поступила в редакцию 03.08.2020 г.

После доработки 15.09.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

Землетрясения с магнитудами $M_w = 6.4$ и $M_w = 7.1$ произошли 4 и 6 июля 2019 г. одно за другим с интервалом 34 ч в нескольких километрах друг от друга вблизи города Риджкрест округа Керн, Калифорния, США. В 1995 г. в непосредственной близости от эпицентров будущих землетрясений произошел умеренный толчок магнитудой $M_w = 5.8$. Примерно в ста километрах к северу в 1872 г. произошло сильное землетрясение с $M_w = 7.4$. Для изучения сейсмо-деформационного процесса, в связи с указанными событиями, были использованы данные непрерывных GPS-наблюдений на 51-й станции, с суточным интервалом регистрации. Начальная эпоха наблюдений была отнесена на 13 лет до последних событий (июль 2006 г.), а конечная – примерно на месяц (август 2019 г.) после таковых. Область изучаемой территории имеет диаметр порядка 250 км и включает в себя эпицентры современных и исторических землетрясений. На каждые сутки наблюдений получены цифровые модели распределения горизонтальных деформаций полного сдвига и дилатации. Объединение временной последовательности полученных моделей в ускоренную кинематическую визуализацию сейсмо-деформационного процесса [https://www.researchgate.net/publication/343577013_Ridgecrest_total_shear_strain_and_seismicity_evolution] позволило увидеть интересные особенности. Начало образования экстремума сдвиговой деформации близко к моменту умеренного землетрясения $M_w = 5.2$, произошедшего за 10 лет до событий 2019 г. примерно в 70 км от него, и, предположительно, запустившего триггерный механизм “вспарывания” будущего сейсмического разрыва с началом развития ослабленной вытянутой зоны в районе вулканического поля Косо. Область аномального сдвига распространялась в направлении будущих событий и достигла их положения к моменту главных толчков. Анализ пространственно-временного распределения длины векторов поверхностных смещений показал потенциальную возможность прогноза места будущего сильного события по многолетним непрерывным GPS-наблюдениям в сейсмоактивных областях.

Ключевые слова: деформации земной поверхности, ГНСС, деформационные волны, триггерный эффект, прогноз землетрясений

DOI: 10.31857/S0203030621010041

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня пространственные изменения поверхности Земли уверенно контролируются средствами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с субсантиметровой точностью. Наблюдательная сеть ГНСС, обеспечивающая информацией геодинамические исследования, содержит около двух десятков тысяч постоянно действующих станций. Наиболее плотное пространственное распределение этих станций характерно для территорий Северной Америки, Японского архипелага и Европы. Некоторые станции функционируют уже более трех десятилетий, и их значительное число покрывает наблюдениями более чем десятилетний интервал. Благодаря открытому сервису Геодезической лаборатории Невады (США) сегодня доступны для исследователей временные ряды точных пространственных координат посто-

янно действующих станций ГНСС с временным разрешением в одни сутки [Blewitt и др., 2018]. В регионах высокой сейсмической активности эти станции позволяют отслеживать изменения земной поверхности на всех стадиях сейсмического цикла, во временном интервале, охваченном непрерывными наблюдениями. Сегодня во многих случаях удается исследовать процесс накопления деформаций перед сильными событиями на завершающей стадии межсейсмической фазы на протяжении нескольких лет и даже первых десятилетий. Это обстоятельство позволяет обнаруживать и изучать деформационные предвестники [Kaftan, Melnikov, 2018], а также пространственную миграцию деформаций, провоцирующих и сопровождающих сейсмическое событие [Kaftan, Melnikov, 2019]. Можно говорить о том, что достаточно плотные и обширные сети непрерывных

ГНСС станций позволяют наблюдать и изучать сейсмо-деформационный процесс на стадиях сейсмической подготовки, разрядки и релаксации, представляя тем самым эмпирическую основу для разработки моделей прогнозирования крупных и сильных сейсмических событий.

На Западном побережье Северной Америки произошло уже несколько сильных и крупных землетрясений в пределах достаточно плотных ГНСС сетей. Перед сейсмическими событиями накоплены измерительные данные на интервалах более 10 лет. Поэтому интересным экспериментальным районом явилось место возникновения серии землетрясений Риджкрест 2019 г.

Землетрясения с магнитудами $M_w = 6.4$ и $M_w = 7.1$ произошли в июле 2019 г. одно за другим с интервалом 34 часа в нескольких километрах друг от друга вблизи города Риджкрест округа Керн, Калифорния, США. Примечательно, что в 1995 г. в непосредственной близости от эпицентров новых землетрясений произошел умеренный толчок магнитудой $M_w = 5.8$. Немногим более чем в ста километрах к северу от эпицентров современных событий в 1872 г. произошло сильное землетрясение с $M_w = 7.4$.

По мнению авторов [Wang et al., 2020], крупное землетрясение $M_w = 6.4$ является форшоком более сильного события.

Эта серия землетрясений изучена с использованием ГНСС наблюдений в ряде публикаций [Matioli et al., 2019; Wang et al., 2020]. В то же время пока что не встречаются публикации с анализом деформаций земной поверхности на более чем десятилетнем временном интервале и на территории большего охвата.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Опыт анализа движений и деформаций земной поверхности в районах возникновения крупных и сильных землетрясений, а также в зонах активного вулканизма [Кафтан, Родкин, 2019; Kaftan, Melnikov, 2019] показал, что размеры контрольных сетей не должны быть слишком малы и ограничиваться исключительно размерами эпицентральных зон форшоков и афтершоков главных событий. Зачастую локальные геодезические наблюдения в непосредственной близости от эпицентральных зон и внешних проявлений вулканизма не полностью контролируют соответствующий деформационный процесс, упуская из вида его важные стороны. Контрольные сети прогностического назначения должны покрывать территории радиусом на порядок больше длины сейсмического разрыва, характерной для события соответствующей магнитуды [Ризниченко, 1985].

Для изучения сейсмо-деформационного процесса нами были использованы данные непрерывных GPS-наблюдений 51-й станции, с суточным интервалом регистрации [Blewitt и др., 2018]. Временные ряды координат наблюдательных

пунктов были получены с использованием стратегии точного определения местоположения — Precise Point Positioning (PPP), с использованием точных эфемерид и поправок часов спутников GPS, а также другой точной продукции Международной службы Глобальных навигационных спутниковых систем (International GNSS Service). Используемые временные ряды содержат среднесуточные определения координат в системе отсчета IGS14. Точность определения пространственного положения пункта для данной стратегии оценивается как субсантиметровая. Разрывы в наблюдениях заполнялись значениями координат, интерполированными с помощью сплайнов Эрмита. Конфигурация контрольной геодезической сети представлена на рис. 1.

Область покрытия территории наблюдательной сетью имеет диаметр около 250 км и включает в себя эпицентры как современных, так и упомянутых выше исторических событий.

Начальная эпоха определения движений и деформаций была отнесена примерно на 13 лет до серии землетрясений Риджкрест (июль 2006 г.), а конечная — на месяц (август 2019 г.) после таковых.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ РАЙОНА

На каждые сутки наблюдений были получены цифровые модели распределения горизонтальных деформаций полного сдвига и дилатации. Отметим, что в анализе использованы только горизонтальные деформации, в связи с особенностями механизма взаимодействия Северо-Американской и Тихоокеанской плит в данном районе.

Для вычисления деформаций конечных элементов был использован тензор горизонтальной деформации (оси n и e направлены на север и восток)

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

элементы которого были равными $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$, $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$ 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 формируются частными производными смещений u_n и u_e по осям координат n и e .

Для изучения пространственно-временного распределения горизонтальных деформаций были рассчитаны следующие инвариантные характеристики.

1) Главные деформации ε_1 и ε_2

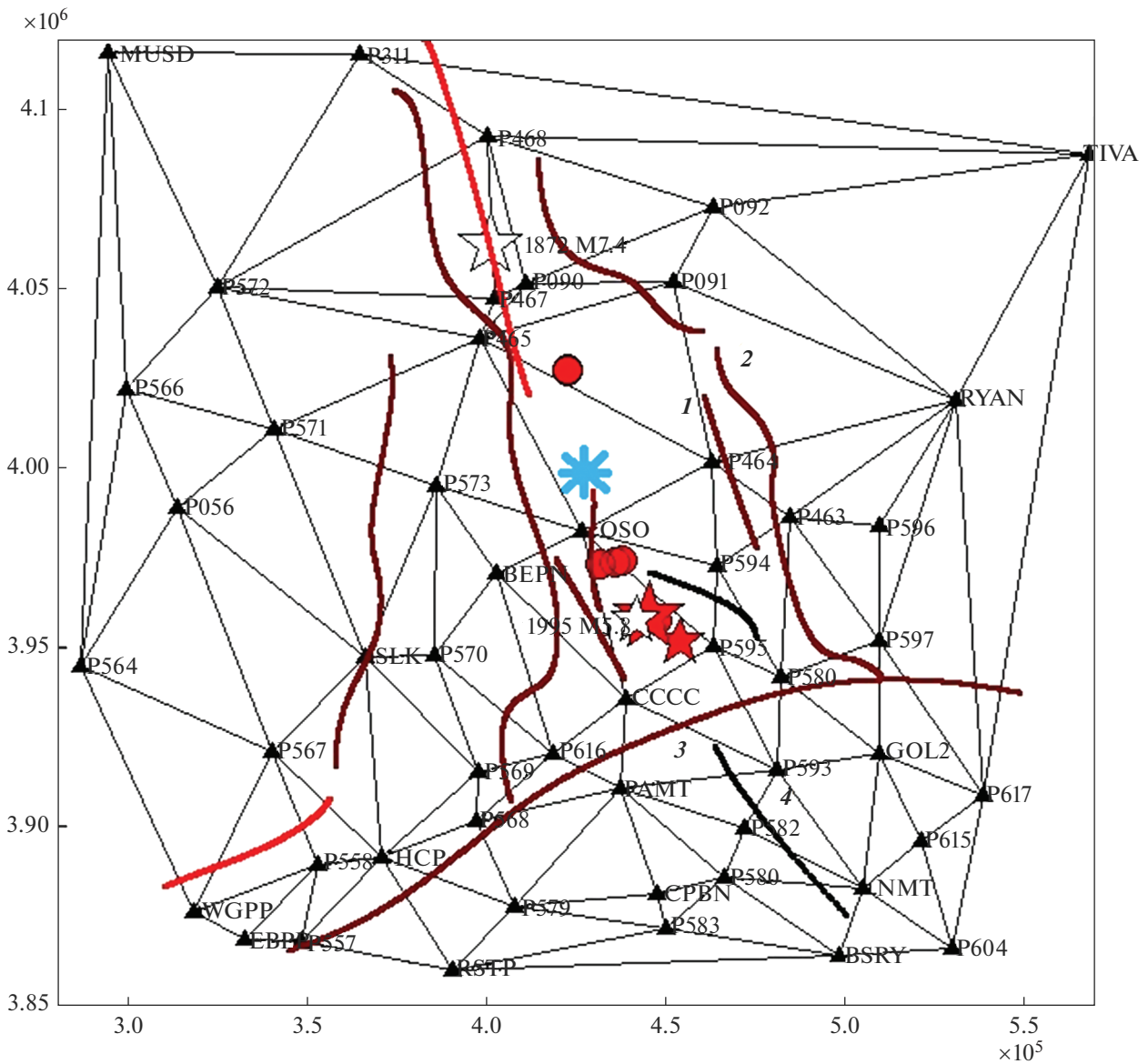


Рис. 1. Конфигурация конечных элементов сети непрерывно действующих GPS-станций (черные треугольники). Тектоническая обстановка по информации Базы данных о четвертичных разломах Геологической службы США (USGS) Quaternary fault database): красные линии – современные сейсморазрывы возрастом активизации менее 150 лет; коричневые линии – позднечетвертичные разломы моложе 15000 лет; черные кривые – недифференцированные четвертичные разломы моложе 1.6 млн лет. 1 – разлом Аш Хилл, 2 – разломная зона Панаминт Велли, 3 – разломная зона Гэрлок, 4 – разломная зона Блеквотер. Эпицентры сейсмических событий: белые звезды – исторические землетрясения; красные звезды – сильное и крупное землетрясения Риджкрест; красные окружности – умеренные землетрясения последнего десятилетия; синяя восьмиконечная звезда – расположение Вулканического поля Косо; координатная сетка на рамке рисунка дана в универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM).

$$\epsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\epsilon_n + \epsilon_e \pm \sqrt{(\epsilon_n - \epsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right].$$

2) Полный сдвиг $\gamma = \left((\epsilon_n - \epsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

3) Дилатация $\Delta = \epsilon_1 + \epsilon_2$.

Компоненты деформаций были вычислены по методу, описанному Wu et al. [2006].

Ввиду существенной неравновеликости конечных элементов (см. рис. 1), значения деформаций были приведены к средней площади треугольника сети [Kaftan, Melnikov, 2018]. Объединение временной последовательности полученных моделей в ускоренную кинематическую визуализацию сейсмо-деформационного процесса [https://www.researchgate.net/publication/343577013_Ridgecrest_

total_shear_strain_and_seismicity_evolution] позволило обнаружить и изучить его принципиальные особенности. Начало образования экстремума сдвиговой деформации (рис. 2б) расположено вблизи вулканического поля Косо [Simakin, Ghassemi, 2007], где с 2006 г. продолжается серия слабых землетрясений с $M < 5$ и, возможно, также связано с умеренным землетрясением $M_w = 5.2$, произошедшим за 10 лет до событий Риджкрест 2019 г. примерно в 70 км к северу от их эпицентров (см. рис. 2а). Это землетрясение сопровождалось серией более слабых толчков. Область аномального сдвига распространялась в направлении будущих более сильных землетрясений и своим южным флангом достигла их положения к моменту разрывообразования (см. рис. 2в, г). Деформация развивалась также и на восток, затрагивая зоны разломов Аш Хил и Панаминт Велли, проявляющих механизм правостороннего смещения по простиранию. Развитие деформации после главных сейсмических событий и их афтершоков показано на рис. 2г–е.

Наблюдаемые визуально эволюция рассчитанных деформаций земной поверхности и распределение эпицентров зарегистрированных землетрясений, по данным архива Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США [Benz, 2017], демонстрируют их взаимную согласованность. При этом наблюдается определенное сходство с поведением деформации полного сдвига перед землетрясением Напа, $M_w = 6.01$, 2014 г. (Калифорния, США), изученном в работе [Kaftan, Melnikov, 2019]. В случае землетрясения Напа деформационная аномалия полного сдвига, величиной 0.27×10^{-5} , образовалась примерно в 100 км южнее будущего крупного события в результате пары умеренных толчков, произошедших практически одновременно на южном окончании разлома Хайвард. Деформационная аномалия распространялась вдоль разлома на север со скоростью около 20 км/год.

Достигнув места расположения эпицентра землетрясения Напа, эта аномалия преобразовалась в косейсмический сдвиг величиной 1.5×10^{-5} . Такое поведение указало на возможность проявления триггерного эффекта, спровоцировавшего крупное землетрясение. В случае землетрясений Риджкрест узконаправленный “поток” деформации, имевший место в связи с землетрясением Напа, не наблюдается. Виден “размазанный” деформационный фронт, распространяющийся как на юг, так и на восток от Вулканического поля Косо (см. рис. 2в, г). Но в данном случае, в отличие от землетрясения Напа, отсутствует явно выраженный подвижный разлом, играющий роль проводника для перемещения фронта деформации полного сдвига. Геометрически нелинейная форма распространения аномалии сдвига в случае событий Риджкрест, по-видимому, связана с наличием в ее центре термального поля Косо, имеющего множество мелких разрывных нару-

шений над общим магматическим очагом [Simakin, Ghassemi, 2007]. Вероятно, этим объясняется отличие формы мигрирующего “потока”, а также меньшая величина деформации по отношению к случаю землетрясения Напа. На переднем крае фронта она составляет порядка 0.18×10^{-5} . Скорость ее распространения около 7 км/год. То есть в три раза медленнее, чем в случае землетрясения Напа. Это замедление также предположительно можно объяснить отсутствием подвижного квазилинейного разрывного нарушения по направлению распространения деформационного фронта, способствующего быстрому перемещению деформации сдвига. Косейсмический полный сдвиг в этом случае достигает 3×10^{-5} . Он вдвое превысил соответствующую оценку для землетрясения Напа с $M_w = 6.01$, по энергии на порядок меньшего, чем главное событие серии Риджкрест. Учитывая вышесказанное, мы можем предположить определенное сходство эволюции сейсмо-деформационного процесса для обоих случаев.

Эволюцию дилатации мы можем отследить на аналогичном видео, а также на рис. 3, по нескольким его наиболее существенным кадрам. Ввиду того, что смещения по разрывным нарушениям данного региона представляют собой правосторонний сдвиг, обусловленный тенденциями взаимных движений Тихоокеанской и Северо-Американской тектонических плит, деформация дилатации играет второстепенную роль и является подчиненной деформации сдвига. На это показывают диполи дилатации (пары смежных экстремумов растяжения–сжатия), образованные за сутки перед сильными событиями (см. рис. 3в–д), а не за годы, как деформация сдвига. Экстремумы дилатации образуются фронтами сдвиговой деформации по обе стороны от образованного нового сейсмического разрыва, маркируемого сильными, умеренными и слабыми событиями (см. рис. 3д), сжимая и растягивая земную кору по обе стороны от разлома. Эти особенности показывают роль деформаций сдвига и дилатации, регистрируемых средствами ГНСС, в подходах к прогнозированию сильных сейсмических событий [https://www.researchgate.net/publication/344562745_Thirteen-year_evolution_of_the_dilatation_deformation_before_the_Ridgcrest_earthquake_sequence].

ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕСТА БУДУЩЕГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

С целью обнаружения очагов будущих сильных землетрясений проводятся исследования особенностей механизмов происходящих землетрясений и пространственно-временного распределения их гипоцентров. Работ в данном направлении довольно много. Они весьма разноплановые. Поэтому мы рассмотрим лишь те из них, которые имеют отношение к изучаемому району и, собственно, серии землетрясений Риджкрест, а

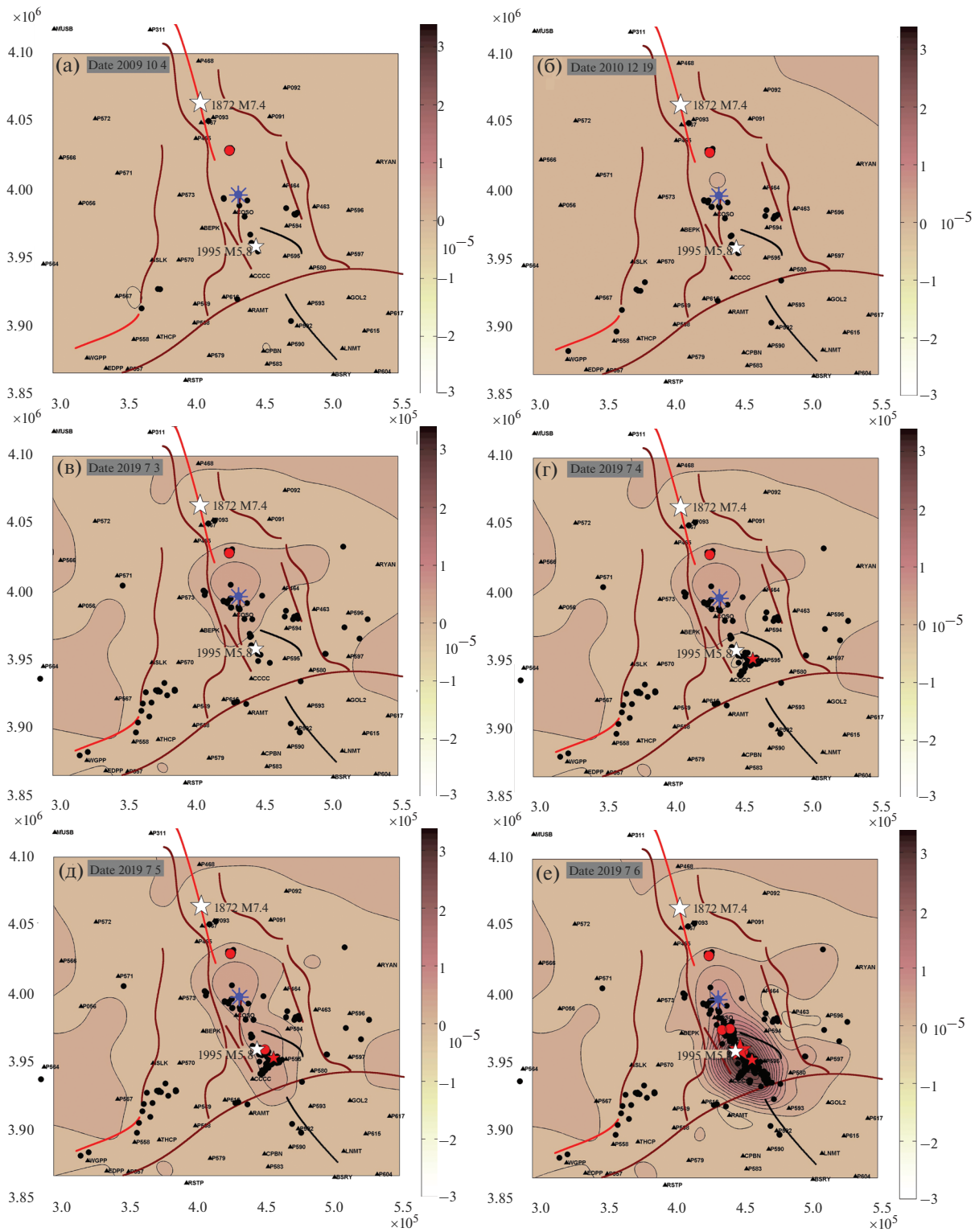


Рис. 2. Распределение деформации полного сдвига перед землетрясениями Риджкрест 2019 г. Сечение изолиний деформации 2×10^{-6} . Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. рис. 1. Черные окружности – эпицентры слабых землетрясений с $M < 5$. Точность определения деформаций не хуже 10^{-7} .

также предложим свой подход как дополнение к общей совокупности комплексных исследований.

Геофизиками активно разрабатываются и развиваются методы распознавания мест сильных землетрясений с использованием средств дискретного математического анализа. Применение одного из таких методов позволило считать область, охватывающую эпицентры событий Риджкрест, как зону возможного землетрясения с $M > 6.5$ [Дзобоев и др., 2018] за год до его возникновения. Оба главных события серии Риджкрест попали в эту зону. Примененный при этом метод детально описан в работах [Гвишиани и др., 2013, 2016]. Отметим, что распознанные таким образом места могут являться объектами исследования движений и деформаций земной поверхности в прогностических целях, как это делается в нашем случае.

В работах [Bondur et al., 2017; Бондур и др., 2020] на примере двух сильных землетрясений в Южной Калифорнии, одно из которых произошло именно в районе Риджкрест, показано, что разработанный авторами метод, основанный на геомеханической модели, может быть использован для мониторинга сейсмоопасных территорий с целью прогнозирования сильных землетрясений. При этом осуществляется контроль за миграцией максимумов вариаций градиентов напряженного состояния земной коры на протяжении нескольких месяцев. Авторами [Бондур и др., 2020] обнаружена локальная аномалия напряженного состояния земной коры в пределах первых десятков километров от сильного землетрясения Риджкрест с $M = 7.1$ за полгода до него.

В работе [Nanjo, 2020], наряду с сейсмологическими и геодезическими наблюдениями, с целью предсказания расположения очага будущего сильного события предлагается отслеживать пространственно-временную эволюцию значений b -value. Показано, что начало разрушения в области низких значений b -value, свидетельствующих о высоких напряжениях, имело место для обеих сильнейших событий серии Риджкрест. Эволюция b -value после землетрясения с $M_w = 7.1$ показала, что существует еще одна зона с низким значением этой характеристики, которая избежала сейсморазрыва и находится вблизи разлома Гарлок, где происходили крупные и сильные исторические землетрясения. Авторы обсуждают сценарий дальнейшего проявления сейсмичности, которая могла бы повлиять на активность разлома Гарлок.

Авторы работы [Stein, Toda, 2020] рассматривают сценарий последующей сейсмической активизации разлома Сан-Андреас. Они полагают, что сейсмическая активность на разломе Гарлок, который распространяется от района событий Риджкрест в направлении разлома Сан-Андреас, может спровоцировать сильное землетрясение в его пределах. Это обстоятельство рассматривается в качестве сценария для относительно продолжительного раннего предупреждения о вероятном землетрясении жителям Лос-Анджелеса.

В связи с вышеупомянутыми сценариями рассмотрим результаты проведенных нами исследований.

Наблюдения за деформационным процессом на протяжении десятилетий перед сильными сейсмическими событиями несут информацию не только о миграции деформационных фронтов, которые могут провоцировать снятие напряжений во время реализации событий, но также и показывают области наибольших напряжений, где следует искать места возникновения будущих сильных коровых землетрясений, разрывы от которых выходят на дневную поверхность. Следуя гипотезе упругой отдачи Рейда [Савиных и др., 2013], местом будущего события является “запертая” зона активного разлома, иначе говоря, зона минимальных деформаций в области подготовки землетрясения. Такую зону в сейсмоактивной области можно картировать по величинам полных смещений пунктов ГНСС, представляющих собой длины векторов горизонтальных смещений. Чем меньше длина вектора смещения, тем менее подвижна территория его расположения. В сейсмоактивной области место минимальных движений, исходя из модели упругой отдачи, является местом максимальных напряжений. И как показано ниже, оно не обязательно бывает связано с картированными сейсмогенерирующими разломами. Рассчитав длины векторов смещений, мы получили цифровые модели их пространственного распределения на каждые сутки и объединили их в видеофильм – визуализацию деформационного процесса [https://www.researchgate.net/publication/344174534_Thirteen-year_evolution_of_the_low-displacement_zone_before_the_Ridgecrest_earthquake_sequence]. Принципиальные кадры фильма представлены на рис. 4. Первый кадр (см. рис. 4а) соответствует моменту возникновения умеренного землетрясения, явившегося, по нашему предположению, пусковым. На этот момент за 3.5 г. наблюдений накоплены лишь первые сантиметры смещений. Тем не менее уже видна их локализация в вытянутой примерно с севера на юг области возникновения сильнейших сейсмических событий (темно-коричневая зона). По мере накопления наблюдений, зона сужается и за сутки до возникновения сильных событий (см. рис. 4в) она становится достаточно узкой, шириной 20–50 км. Такую особенность демонстрируют также пространственно-временные изменения векторов горизонтальных смещений в районах подготовки других сильных землетрясений [Kaftan, Melnikov, 2018]. Вблизи этой зоны происходит серия землетрясений Риджкрест (см. рис. 4г–е). Заметим, что на протяжении всего интервала наблюдений эта зона не является однородной. Она нарушается сейсмическими событиями малой и умеренной величины. Так на рис. 4а–г, внутри “запертой” зоны развивается подвижная светлая область – зона вулканического поля Косо, внутри которой происходят слабые сейсмические события, согласованно с ее размерами и

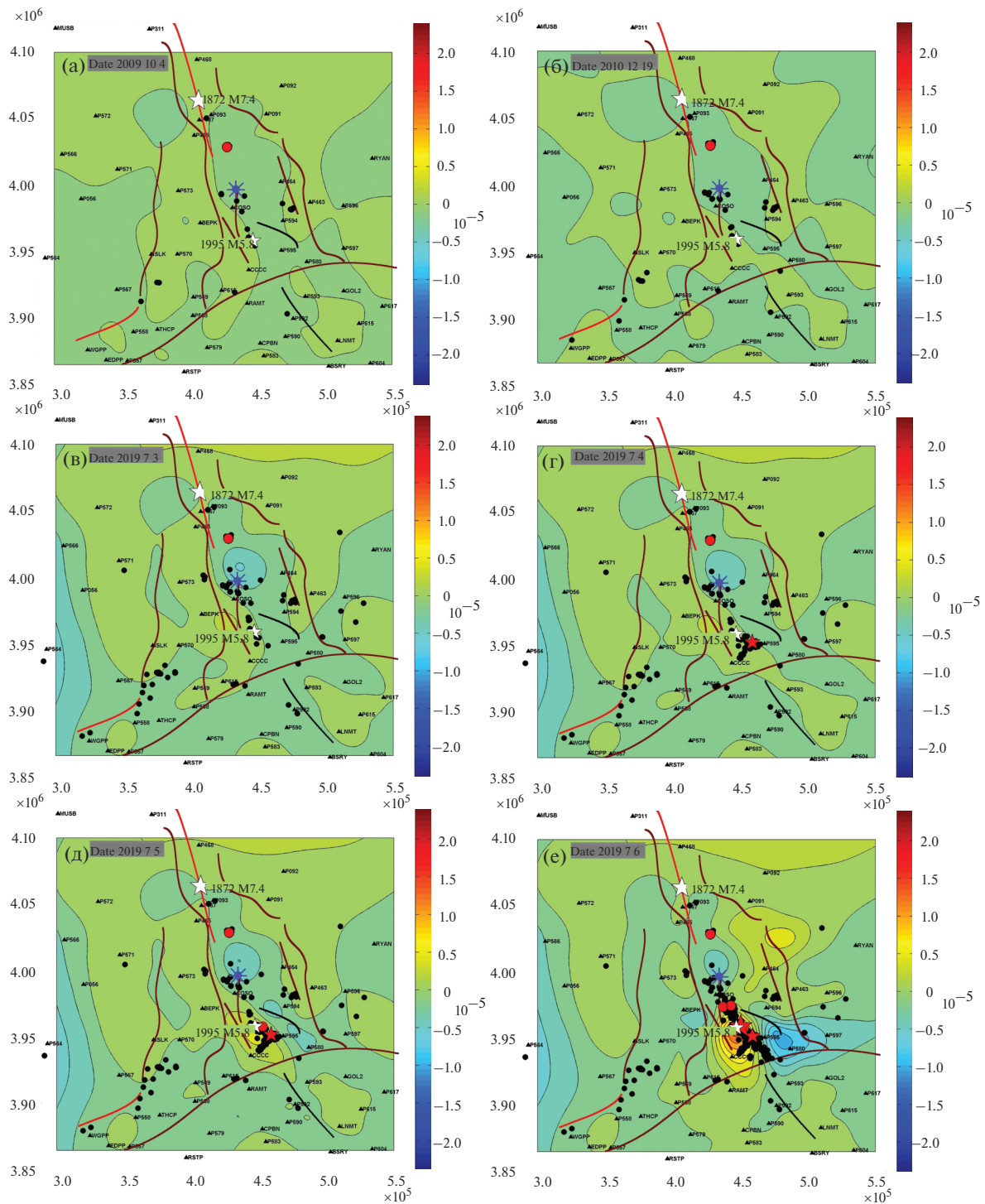


Рис. 3. Распределение деформации дилатации перед землетрясениями Риджкрест 2019 г. Сечение изолиний деформации 2×10^{-6} . Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. рис. 1. Черные окружности – эпицентры слабых землетрясений с $M < 5$. Точность определения деформаций не хуже 10^{-7} .

формой. Их число внутри области возрастает, увеличивая подвижность этой территории. Мы бы сочли эти землетрясения форшоками событий Риджкрест, но они удалены от положений их эпи-

центров на десятки километров. В то же время они находятся в области миграции аномальной деформации полного сдвига (см. рис. 2в–д), т.е. обуславливают эту подвижность.

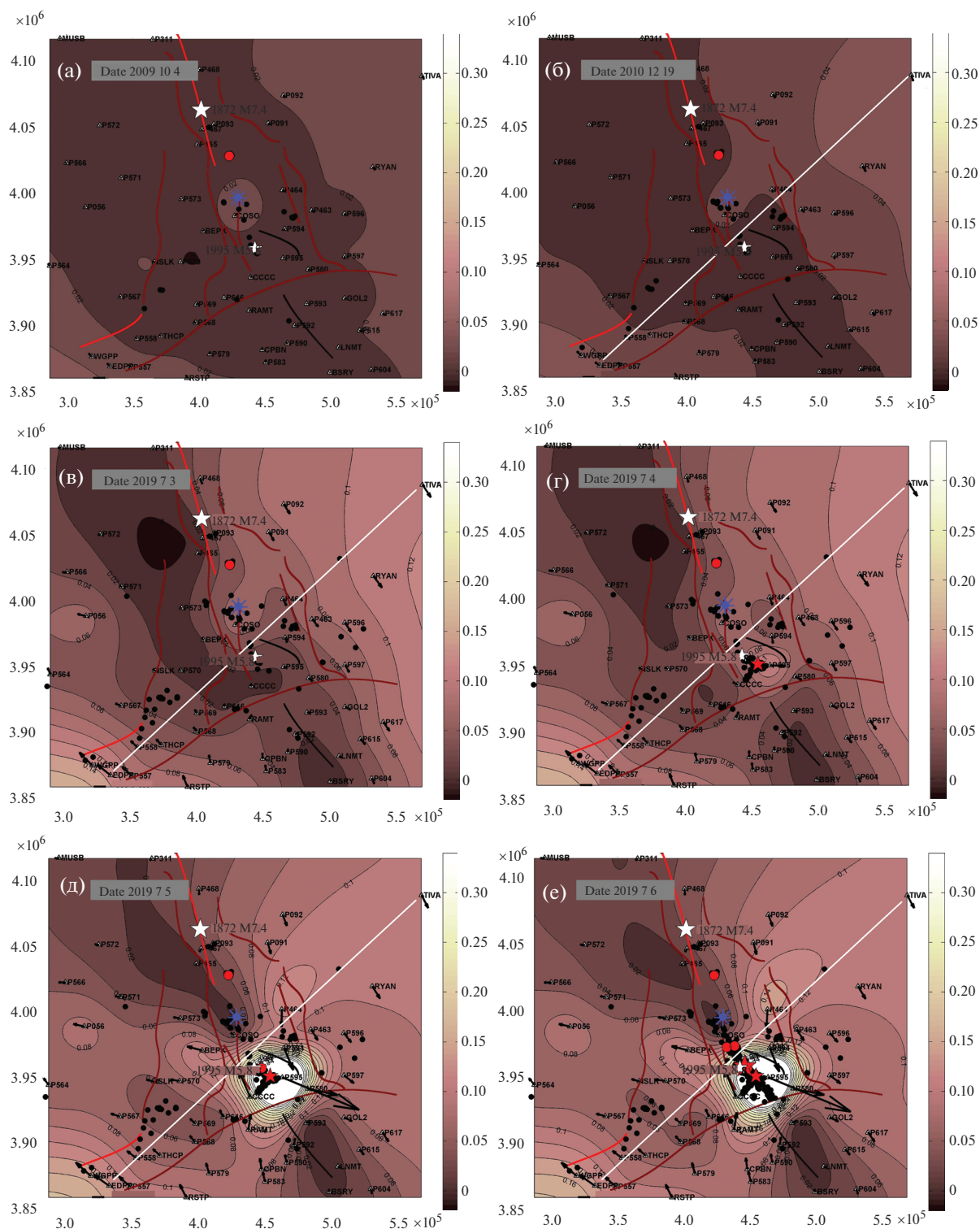


Рис. 4. Распределение полных смещений перед землетрясениями Риджкрест 2019 г. Сечение изолиний полного смещения – 2 см. Стрелки представляют собой векторы горизонтальных смещений пунктов. Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. рис. 1. Черные окружности – эпицентры слабых землетрясений с $M < 5$. Точность определения полного смещения не хуже 5 мм.

После реализации крупных и сильных событий область минимальных смещений разрушается, образуя на полученных изображениях белые

пространства (см. рис. 4г–е). Эти проявления демонстрируют возможность регистрации области ожидания сильных сейсмических событий анало-

гичного типа, там, где наблюдаются интенсивные сдвиговые деформации земной поверхности. Остается понять, как в таких “напряженных” областях, вытянутых на сотни километров, можно более точно локализовать место будущего сильного события. Гипотеза упругой отдачи предоставляет такую возможность, предполагая, что землетрясение происходит в области минимальных движений, но максимального упругого искривления земной поверхности по профилю, перпендикулярно пересекающему запертую зону [Савиных и др., 2013]. Такой профиль на своих окончаниях имеет максимальные движения ГНСС станций в противоположных направлениях. Он показан на рис. 4 белой прямой линией, соединяющей наиболее подвижные пункты (TIVA на северо-востоке и EDPP на юго-западе) в исследуемой области, имеющие наибольшие векторы смещений в противоположных направлениях. Можно видеть, что серия землетрясений Риджквест произошла на удалении первых десятков километров от точки пересечения вытянутой зоны минимальных движений (максимальных напряжений) и линии наибольшего искривления земной поверхности. Заметим, что зона минимальных движений не была стабильной во времени. Она нарушалась слабыми землетрясениями, предшествующими более сильным событиям. Это осложняло фиксацию места будущего землетрясения.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имея ввиду, что совокупность эпицентров форшоков и афтершоков исследуемых событий образует узкий вытянутый кластер, как видимое продолжение сейсморазрыва 1872 г., протяженностью около ста км, можно предполагать, что это историческое сейсмическое событие генетически связано с серией землетрясений Риджквест и, вероятно, их последовательность формирует единый сейсмический цикл продолжительностью ~150 лет.

Существование медленных деформационных волн теоретически предсказывалось, например, в работах [Sherman, 2013; Вуков, 2018]. Физическое моделирование деформационных волн в сдвиговой зоне осуществлено в работе [Борняков и др., 2018]. В платформенных зонах деформационные волны были зарегистрированы во второй половине прошлого столетия по данным высокоточного нивелирования [Kuz'min, 2012]. Настоящее исследование демонстрирует существование волн сдвиговых деформаций в сейсмоактивных районах и характеризует их роль в сейсмическом процессе. Сходство развития мигрирующих деформаций для случаев землетрясения Напа (2014 г.) и серии землетрясений Риджквест (2019 г.) позволяет предполагать наличие триггерного эффекта, способствующего сбросу критических напряжений, — поверхностной деформационной волны как в первом, так и во втором случаях.

Достаточно плотные сети непрерывно действующих ГНСС станций представляют важную информацию о развитии сейсмо-деформационного процесса. Модели площадного распределения полного смещения ГНСС пунктов и визуализации их временной эволюции позволяют продемонстрировать возможность обнаружения места будущего сильного землетрясения за годы до него при условии непрерывных наблюдений не менее 10 лет до события.

В отношении сценариев распространения сейсмогенерирующих напряжений на разлом Гарлок и дальнейшего влияния этих напряжений на разлом Сан-Андреас можно предположить следующее.

Как показывают рис. 4д, е, после серии Риджквест напряжения мигрировали на юг, по направлению продолжения общей зоны повышенных напряжений, но также и на юго-запад, охватывая Гарлок и соседний разлом к северо-западу от него. Эта особенность свидетельствует в пользу правдоподобности сценариев сейсмической активизации разломов Гарлок и, в последствии, Сан-Андреас.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Локальная аномалия напряженного состояния земной коры перед сильным землетрясением ($M = 7.1$) 05.07.2019 г. в районе г. Риджквест (Южная Калифорния) // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 17–21.
<https://doi.org/10.31857/S2686739720010016>
- Борняков С.А., Пантелеев И.А., Черемных А.В., Каримова А.А. Экспериментальное исследование периодической активизации разлома в сейсмической зоне // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 653–670.
<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0366>
- Дзедобоев Б.А., Красноперов Р.И., Белов И.О., Барыкина Ю.И., Вавилин Е.В. Модифицированная алгоритмическая система FCAZm и зоны возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2018. № 2. С. 2–8.
- Кафтан В.И., Родкин М.В. Деформации района вулкана Этны по данным GPS-измерений, интерпретация, связь с режимом вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 14–24.
<https://doi.org/10.31857/S0203-03062019114-24>
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии // Избранные труды. М.: Наука, 1985. С. 19–23.
- Савиных В.П., Певнев А.К., Ямбаев Х.К. Теория упругой отдачи, дилатансия, геодезия — прогноз // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 29–34.
- Benz H. Building a National Seismic Monitoring Center: NEIC from 2000 to the Present // Seismol. Res. Lett. 2017. V. 88(2B). P. 457–461.
<https://doi.org/10.1785/0220170034>

- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C.* Harnessing the GPS data explosion for inter-disciplinary science // *Eos*. 2018. V. 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* The dynamics of the stress state in Southern California based on the geo-mechanical model and current seismicity: Short term earthquake prediction // *Russ. J. Earth. Sci.* 2017. V. 17. ES1005. <https://doi.org/10.2205/2017ES000596>
- Bornyakov S.A., Pantelev I.A., Cheremnykh A.V., Karimova A.A.* Physical modeling experiments to study periodic activation of fault in seismic zones // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2018. V. 9(3). P. 653–670. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0366>
- Bykov V.* Prediction and observation of strain waves in the Earth // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. V. 9(3). P. 721–754. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0369>
- Fielding E.J., Liu Z., Stephenson O.L., Zhong M., Liang C., Moore A., Yun S.-H., Simons M.* Surface Deformation Related to the 2019 M_w 7.1 and 6.4 Ridgecrest Earthquakes in California from GPS, SAR Interferometry, and SAR Pixel Offsets // *Seismol. Res. Lett.* 2020. V. 20. P. 1–12. <https://doi.org/10.1785/0220190302>
- Kaftan V.I., Melnikov A.Yu.* Revealing the deformational anomalies based on GNSS data in relation to the preparation and stress release of large earthquakes // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2018. V. 54(1). P. 22–32. <https://doi.org/10.1134/S1069351318010093>
- Kaftan V., Melnikov A.* Migration of Earth Surface Deformation as a Large Earthquake Trigger / Eds G. Kocharyan, A. Lyakhov // *Trigger Effects in Geosystems*. Springer Proc. in Earth and Environ. Sci. Cham: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_8
- Kuz'min Yu.* Deformation autowaves in fault zones // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2012. V. 48(1). P. 1–16. <https://doi.org/10.1134/S1069351312010089>
- Nanjo K.Z.* Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 3082. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16867-5>
- Reid H.F.* The elastic-rebound theory of earthquakes // *Bull. Dep. Geol. California: University of California Publication*, 1911. V. 6. P. 413–444.
- Sherman S.I.* Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013. V. 4(2). P. 83–117 (In Russ). <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093>
- Simakin A.G., Ghassemi A.* The mechanics of a magma chamber-fault system in trans-tension with application to Coso // *J. Struct. Geol.* 2007. V. 29. P. 1971–1983. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.08.009>
- Stein R.S., Toda S.* Ridgecrest earthquakes could cause a San Andreas chain reaction // *Temblor*. 2020. <https://doi.org/10.32858/temblor.103>
- Wang K., Dreger D.S., Tinti E., Bürgmann R., Taira T.* Rupture Process of the 2019 Ridgecrest, California M_w 6.4 Fore-shock and M_w 7.1 Earthquake Constrained by Seismic and Geodetic Data // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2020. V. 20. P. 1–24. <https://doi.org/10.1785/0120200108>
- 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 // *J. of Geodynamics*. 2006. V. 41. P. 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.01.003>

Analysis of Movements and Deformations of the Earth's Surface from Thirteen Years GPS Observations Before and During The Ridgecrest Earthquakes (July 2019, USA, California)

V. I. Kaftan*

Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Molodezhnaya str., 3, Moscow, 119296 Russia

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

Earthquakes with magnitudes $M_w = 6.4$ and $M_w = 7.1$ occurred in July 2019, one after the other with an interval of 34 hours, several kilometers apart near the city of Ridgecrest in Kern County, California, USA. There was a moderate shock with a magnitude of $M_w = 5.8$ in the immediate vicinity of the epicenters of future earthquakes in 1995. A strong earthquake with $M_w = 7.4$ occurred about a hundred kilometers to the north in 1872. To study the seismic-deformation process, in connection with these events, data from continuous GPS observations at the 51st station were used, with a daily recording interval. The initial observation epoch was attributed to 13 years prior to the latest events (July 2006), and the final epoch – about a month (August 2019) after those. The study area has a diameter of about 250 km and includes the epicenters of modern and historical earthquakes. Digital models of the distribution of horizontal deformations of complete shear and dilatation were obtained for each day of observations. Combining the time sequence of the obtained models into an accelerated kinematic visualization of the seismic-deformation process [https://www.researchgate.net/publication/343577013_Ridgecrest_total_shear_strain_and_seismicity_evolution] made it possible to see interesting features. The onset of shear deformation extremum formation close to the time of the moderate earthquake $M_w = 5.2$, which occurred 10 years before the events of 2019, about 70 km from it, and, presumably, triggered the trigger mechanism of “ripping open” of the future seismic rupture with the beginning of the development of a weakened elongated zone in the area of the Coso volcanic field. The area of anomalous shear spread in the direction of future events and reached their position at the time of the main shocks. Analysis of the space-time distribution of the length of the surface displacement vectors showed the possibility of determining the location of a future strong event based on long-term continuous GPS observations in seismically active areas.

Keywords: earth's surface deformation, GNSS, deformation waves, trigger effect, earthquake prediction