



LONG-TERM CHANGES IN CRUSTAL MOVEMENTS AND DEFORMATIONS BEFORE AND DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE SEQUENCE

V.I. Kaftan , V.N. Tatarinov , R.V. Shevchuk

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

ABSTRACT. The Kyushu Island, as well as whole Japanese archipelago, is equipped with dense GPS network (GEONET). It allows us to track the movements and deformations of the earth's surface over long-term time intervals. In this study, based on daily determinations of the coordinates of GPS stations, analysis has been made on long-term trends in the accumulation of movements and deformations in large areas of the Kyushu Island before the series of April 14–16, 2016 Kumamoto earthquakes to identify deformation precursors and locked, immobile fault zones. The study of the seismic deformation process was performed using the data from 70 continuous permanent GPS stations for the period 2009–2016.

The movement and deformation features found characterize the kinematics of the axial zone of the southwestern part of the island arc of the Japanese archipelago. The combination of coseismic compression and uplift in the center of the formed triad of deformation extrema and the consistency between subsidence and extensions at its edges demonstrate the mechanism of growth of the central region of the island arc under compression and the role of volcanism. Of particular interest in the context of the development of movements and deformations during the generation of the Kumamoto earthquakes is the behavior of the minimum displacement moduli of the GNSS sites. Analysis of their kinematics shows the formation of a zone of minimum displacements, in which subsequent strong seismic events were localized. It is shown that rather dense and extensive GNSS networks allow observing and studying the seismic-deformation process at the stages of seismic generation, discharge and relaxation, thereby providing an empirical basis for the development of models for predicting large seismic events.

KEYWORDS: earth's surface deformation; GPS; fault locking; slip deficit; earthquake prediction

FUNDING: This work was conducted in the framework of budgetary funding for the Geophysical Center of RAS, approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Vladimir I. Kaftan, kaftan@geod.ru

English version: see article page online

Received: September 4, 2021

Revised: November 16, 2021

Accepted: December 13, 2021

FOR CITATION: Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V., 2022. Long-term changes in crustal movements and deformations before and during the 2016 Kumamoto earthquake sequence. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (1), 0570. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0570

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ДО И ВО ВРЕМЯ СЕРИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУМАМОТО (2016 г., ЯПОНИЯ)

В.И. Кафтан, В.Н. Татарин, Р.В. Шевчук

Геофизический центр РАН, 119296, Москва, ул. Молодежная, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. На острове Кюсю, как и на всем Японском архипелаге, функционирует густая перманентная сеть GPS (GEONET), которая позволяет отслеживать движения и деформации земной поверхности на многолетних временных интервалах. В настоящем исследовании по суточным определениям координат станций GPS анализируются долготермические тенденции накопления движений и деформаций на значительной территории о-ва Кюсю перед серией землетрясений Кумамото (14–16 апреля 2016 г.) с целью выявления деформационных предвестников и поиска неподвижных «запертых» зон разломов. Для изучения сейсмодеоформационного процесса использованы данные непрерывных GPS-наблюдений 70 непрерывнодействующих станций за период 2009–2016 гг.

Выявленные особенности движений и деформаций характеризуют кинематику осевой зоны юго-западной части островной дуги Японского архипелага. Сочетание косейсмических сжатия и подъема в центре образованной триады экстремумов деформации и согласованность опусканий с растяжениями на ее краях демонстрируют механизм роста центральной области островной дуги в условиях сжатия и роль вулканизма. Наибольший интерес в отношении развития движений и деформаций в процессе подготовки землетрясений Кумамото представляет поведение минимальных модулей смещений пунктов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Анализ их кинематики показывает образование области минимальных смещений, в которой были локализованы последующие сильные сейсмические события. Показано, что достаточно плотные и обширные сети ГНСС станций позволяют наблюдать и изучать сейсмодеоформационный процесс на стадиях сейсмической подготовки, разрядки и релаксации, представляя тем самым эмпирическую основу для разработки моделей прогнозирования крупных и сильных сейсмических событий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деформация земной поверхности; GPS; запертие разлома; дефицит смещения; прогноз землетрясений

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки РФ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время движения земной поверхности уверенно контролируются средствами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с субсантиметровой точностью. Мировая наблюдательная сеть ГНСС содержит около двух десятков тысяч постоянно действующих станций. Наиболее плотное пространственное распределение этих станций характерно для территорий Японского архипелага, Северной Америки и Европы, в том числе для сейсмически опасных районов. Некоторые станции функционируют уже более трех десятилетий. Благодаря открытому сервису Геодезической лаборатории Невады (США) сегодня доступны для исследователей временные ряды точных пространственных координат постоянно действующих станций ГНСС с временным разрешением в одни сутки [Blewitt et al., 2018]. Эти станции позволяют отслеживать изменения земной поверхности на всех стадиях сейсмического цикла, во временном интервале, охваченном непрерывными наблюдениями. Во многих случаях удается исследовать процесс накопления деформаций перед сильными событиями на завершающем этапе межсейсмической фазы на протяжении нескольких лет и даже первых десятилетий.

Это позволяет обнаруживать и изучать деформационные предвестники землетрясений [Kaftan, Melnikov, 2018], а также пространственную миграцию деформаций, провоцирующих и сопровождающих сейсмическое событие [Kaftan, Melnikov, 2019]. Можно утверждать, что достаточно плотные и обширные сети непрерывных ГНСС станций дают возможность наблюдать и изучать сейсмодеоформационный процесс на стадиях сейсмической подготовки, разрядки и релаксации, представляя тем самым эмпирическую основу для разработки моделей прогнозирования крупных и сильных сейсмических событий.

В регионе Японского архипелага сильнейшие землетрясения с $M > 8$ происходят главным образом в области глубоководных желобов. Эти территории пока что недоступны для высокоточных повторных геодезических измерений, но соответствующие технологии уже разрабатываются и применяются ввиду их дециметровой точности для изучения, главным образом, косейсмических сдвигов морского дна и раннего предупреждения цунами [Yamagiwa et al., 2015; Yang, Qin, 2021]. В то же время разрушительные коровые землетрясения Японии с $M < 8$ происходят также на островных территориях. Такими сейсмическими событиями

явилась серия землетрясений Кумамото 2016 г. Первый форшок M_w 6.5 был отмечен 14.04.2016 в 21:26 UTC. Эпицентр находился на глубине 12 км на северо-западе от г. Кумамото непосредственно на сочленении системы разломов Хинаги и Футагава [Kato et al., 2016]. В последующие часы было зарегистрировано еще по крайней мере 11 подземных толчков магнитудой M_w более 4.5. Максимальная магнитуда одного из них, произошедшего южнее – по простиранию системы разломов Хинаги, составляла 6.4. Главный толчок M_w 7.3 был зарегистрирован 16 апреля в 1:25 UTC на глубине ~ 10 км.

На территории о-ва Кюсю, где произошла серия указанных событий, имеется плотная сеть непрерывных ГНСС наблюдений GEONET [Sagiya, 2004; Kawamoto et al., 2016], являющаяся сегментом международной службы ГНСС (IGS) [Johnston et al., 2017]. На пунктах наблюдательной сети перед возникновением землетрясений накоплены временные ряды пространственных координат продолжительностью около семи лет, полученные по суточным непрерывным измерениям

по технологии, описанной ниже, поэтому уникальным экспериментальным районом явилось место возникновения серии землетрясений Кумамото 2016 г.

В той или иной мере характер деформаций и движений земной поверхности по данным GPS и средств дистанционного зондирования уже основательно изучен. Косейсмические и постсейсмические деформации с использованием GPS-наблюдений исследованы в ряде работ [Kawamoto et al., 2016; Tanaka et al., 2019; Kubodera et al., 2017; Moore et al., 2017; He et al., 2019; Dahmen et al., 2020]. В то же время пока что не встречаются публикации с анализом пространственно-временной эволюции досейсмических движений и деформаций земной поверхности на семилетнем временном интервале с ежесуточной частотой регистрации на территории большого охвата. Это обстоятельство побудило авторов к проведению настоящего исследования.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Опыт анализа движений и деформаций земной поверхности в районах возникновения крупных и сильных

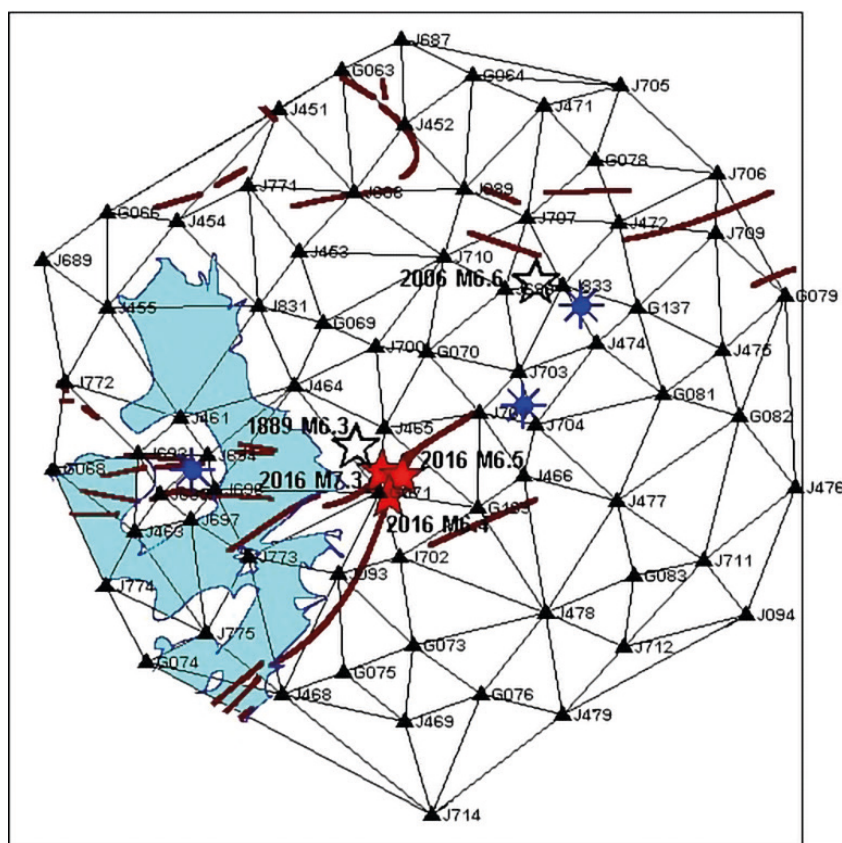


Рис. 1. Конфигурация конечных элементов сети непрерывнодействующих GPS-станций (черные треугольники с названиями пунктов). Тектоническая обстановка по данным [Active Fault Database of Japan, 2021] обобщенно.

Коричневые линии – тектонические разломы. Эпицентры сейсмических событий: белые звездочки – исторические землетрясения в районе, красные – сильные землетрясения серии Кумамото 2016 г., синие восьмиконечные звездочки – активные вулканы. Голубая поверхность – морская акватория.

Fig. 1. Configuration of finite elements of a network of permanently operating GPS stations (black triangles with site names). The tectonic setting is generally presented from [Active Fault Database of Japan, 2021].

The brown lines are tectonic faults. Epicenters of seismic events: white stars are historical earthquakes in the area, red stars are strong earthquakes of the 2016 Kumamoto series, blue eight-pointed stars are active volcanoes. The blue area is the sea surface.

землетрясений, а также в зонах активного вулканизма [Kaftan, Rodkin, 2019; Kaftan, Melnikov, 2019] показывает, что размеры контрольных сетей не должны быть слишком малы и ограничиваться исключительно размерами эпицентральных зон форшоков и афтершоков главных событий. 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, превышающим длину сейсмического разрыва, характерную для события соответствующей магнитуды [Riznichenko, 1992].

Для изучения сейсмодеформационного процесса в настоящей работе были использованы данные GPS-наблюдений 70 непрерывнодействующих станций с суточным интервалом регистрации. 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

[Blewitt et al., 2018]. 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 180 км и включает в себя эпицентры как современных, так и упомянутых выше исторических событий. Здесь необходимо отметить, что в 1889 г. в непосредственной близости от эпицентральной зоны серии землетрясений 2016 г. произошло достаточно сильное землетрясение с $M6.3$ (рис. 1). Этот факт дает основание делать предположения о продолжительности сейсмического цикла последовательности исследуемых здесь сейсмических событий и времени накопления упругих деформаций в земной коре.

Начальная эпоха T_0 определения движений и деформаций по данным ГНСС была зафиксирована на 01 января 2009 г., то есть интервал анализируемых наблюдений составлял более шести лет до возникновения землетрясений.

3. ТЕКТОНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Главным тектоническим объектом, обуславливающим подвижность исследуемой территории, является

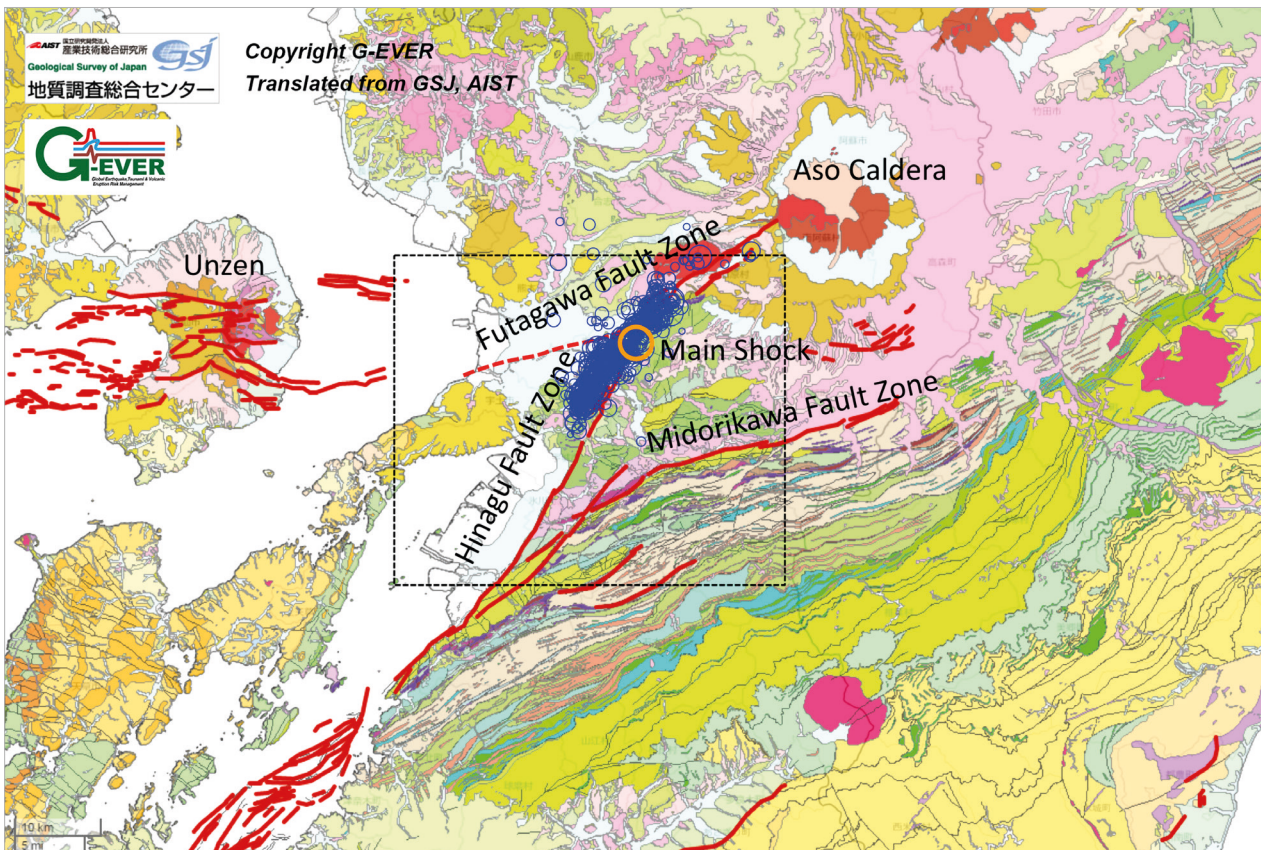


Рис. 2. Карта активных разломов района по данным геологической службы Японии [GSJ Volcanic Hazards..., 2021].

Fig. 2. Map of active faults in the area according to the Geological Survey of Japan [GSJ Volcanic Hazards..., 2021].

зона субдукции Филиппинской тектонической плиты [Nakajima, Hasegawa, 2007].

Тектоника района определяется двумя зонами разломов Хинагу и Футагава (рис. 2), к сочленению которых под острым углом, близким к 35–40°, приурочены рассматриваемые сейсмические события. Система разломов Футагава на севере замыкается в кальдере активного вулкана Асосан.

В исследовании был использован каталог землетрясений с $M > 3$, полученный из интернет-архива Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США [Benz, 2017]. Ввиду того, что точность определения координат эпицентров национальной сейсмической сети Японии заведомо выше точности определений глобального сейсмического центра, координаты эпицентров главных событий были заимствованы из работы [Kawamoto et al., 2016].

По информации интернет-архива [Global Volcanism Program, 2021], за время проанализированных GPS-наблюдений в районе исследований происходили извержения вулкана Асосан. Наиболее интенсивное извержение с VEI 2 протекало с 30 августа 2014 г. по 1 мая 2016 г. продолжительностью не многим менее двух лет.

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ НАКОПЛЕННЫХ СМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Основой для вычисления горизонтальных смещений пунктов ГНСС явились временные ряды, полученные Геодезической лабораторией Невады [Blewitt et al., 2018]. Горизонтальные смещения U_n и U_e вычислялись на каждые сутки по отношению к начальной эпохе T_0 как разность плановых координат n и e в проекции УТМ по следующим формулам:

$$U_{n_i} = n_i - n_0, U_{e_i} = e_i - e_0,$$

где индекс i обозначает текущую эпоху измерений.

Смещения пунктов ГНСС, выраженные в глобальной системе отсчета, демонстрируют в первую очередь тенденции движения глобальной тектонической плиты, на которой находится пункт наблюдения. Этот эффект затрудняет отслеживание меньших по амплитуде движений, связанных с локальными изменениями, такими как медленное накопление упругих деформаций земной коры вблизи эпицентра будущего события. В этом случае более показательными являются смещения пунктов, представленные в локальной (внутренней) системе отсчета, хорошо отражающие взаимные разнонаправленные движения бортов локальных разрывных нарушений. Такую локальную (внутреннюю) систему отсчета смещений легко получить вычитанием из каждого смещения U_i в глобальной системе отсчета среднего значения \bar{U}_i , характеризующего общую для всех пунктов сети тенденцию глобальной тектоники, для каждой эпохи измерений. Таким образом, мы получаем систему отсчета смещений (или скоростей смещений) по известному принципу no net translation.

$$u_{n_j} = U_{n_j} - \bar{U}_{n_j}, u_{e_j} = U_{e_j} - \bar{U}_{e_j},$$

где индекс j является порядковым номером пункта ГНСС наблюдений.

На каждые сутки наблюдений по значениям смещений нами были получены цифровые модели распределения горизонтальных деформаций полного сдвига и дилатации. Эти характеристики являются инвариантными по отношению к выбору системы координат.

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 представлены 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

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_n + \varepsilon_e \pm \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right];$$

2) полный сдвиг $\gamma = \left((\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2 \right)^{1/2}$;

3) дилатация $\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

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

Ввиду существенной неравномерности конечных элементов (см. рис. 1) значения деформаций были приведены к средней площади треугольника сети [Kaftan, Melnikov, 2018].

В дополнение к моделям горизонтальных деформаций в едином анализе использовались данные об активных разломах исследуемой территории [Kawamoto et al., 2016].

5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. Анализ движений и деформаций в связи с подготовкой сильнейших сейсмических событий

Рассмотрим характер изменения во времени пространственного распределения горизонтальных и вертикальных смещений исследуемого района в связи с подготовкой главных сейсмических событий. Соответствующие визуализации представлены на рис. 3.

На рис. 3, а, б, в, г, мы видим медленное накопление горизонтальных смещений, достигающих около 10 см

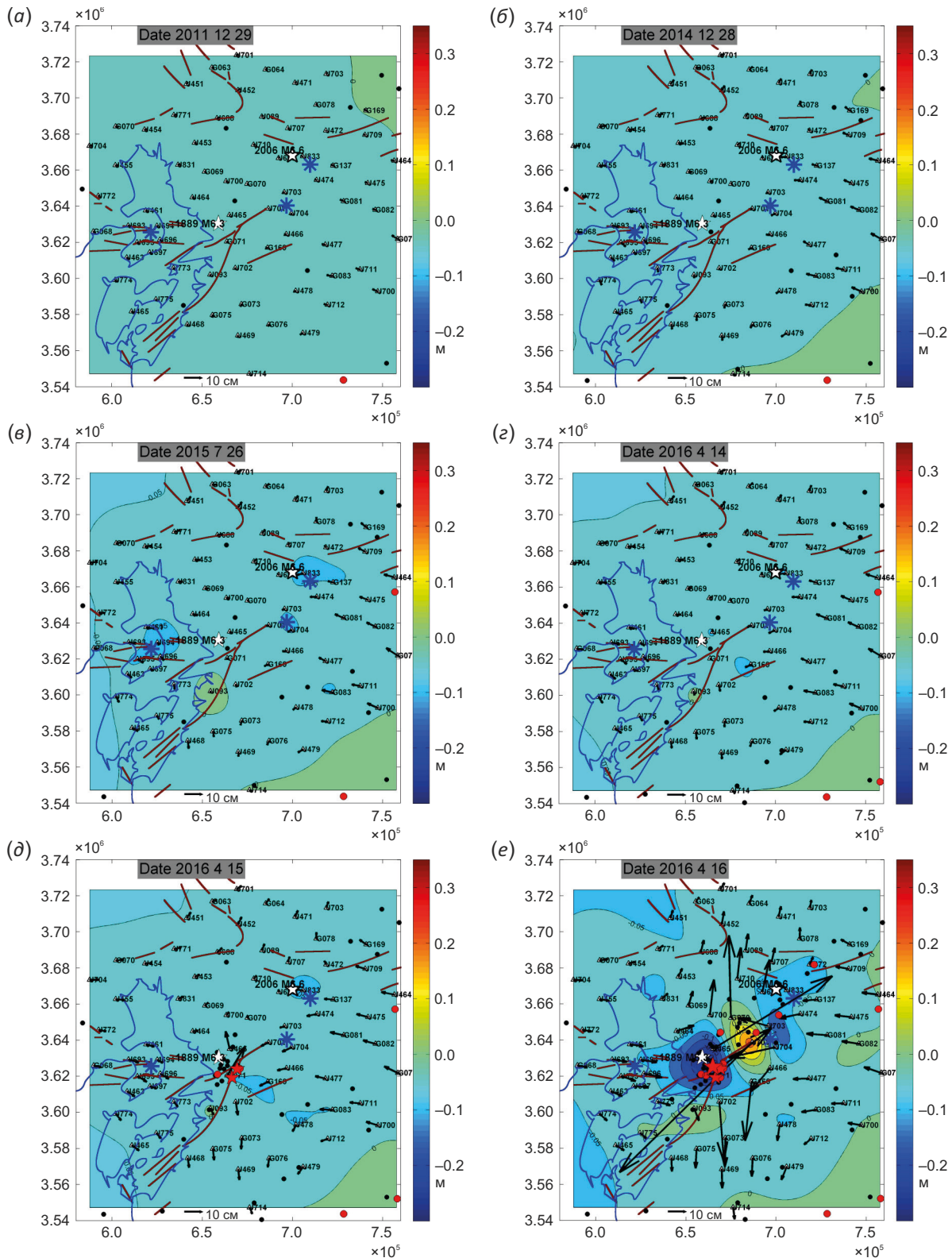


Рис. 3. Распределение накопленных горизонтальных и вертикальных смещений перед землетрясениями Кумамото 2016 г. Сечение изолиний вертикальных смещений – 5 см. Цветовые шкалы представлены справа от рисунков. Стрелки представляют собой векторы горизонтальных смещений пунктов. Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. на рис. 1. Черные окружности – слабые землетрясения. Прямоугольные координаты на рамках рисунков даны в проекции UTM в метрах.

Fig. 3. Distribution of accumulated horizontal and vertical displacements before the 2016 Kumamoto earthquakes. The cross-section of isolines of vertical displacements is 5 cm. Color bars are presented on the right of the figures. Arrows stand for the vectors of horizontal displacements of the sites. See Fig. 1 for the legend of faults and seismic events. Black spots are small earthquakes. The rectangular coordinates on the frames of the figures are given in the UTM projection in meters.

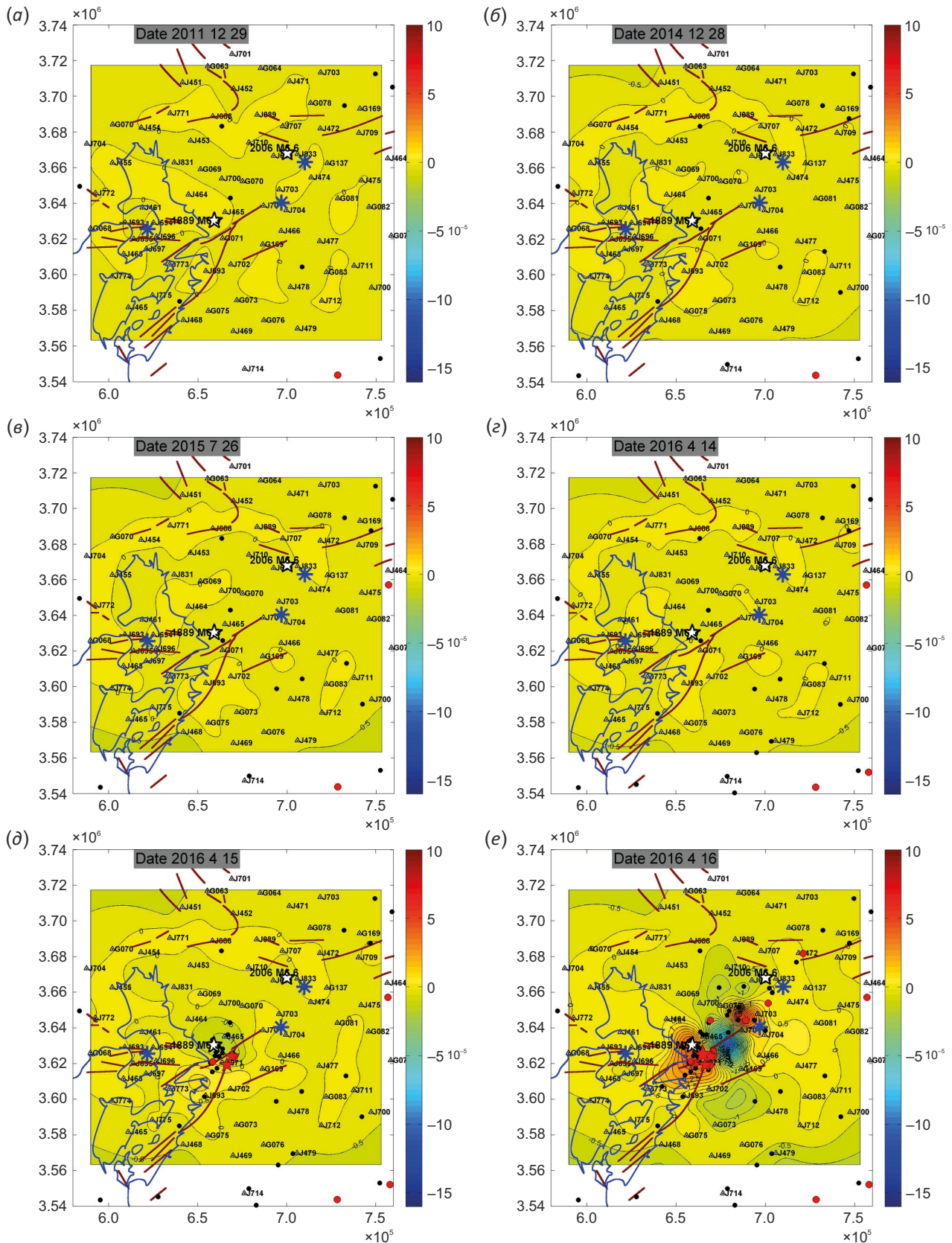


Рис. 4. Распределение деформации дилатации перед землетрясениями Кумамото 2016 г. Сечение изолиний деформации $5 \cdot 10^{-6}$. Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. на рис. 1. Черные окружности – слабые землетрясения. Прямоугольные координаты на рамках рисунков даны в проекции UTM в метрах.

Fig. 4. Distribution of dilatation deformation before the 2016 Kumamoto earthquakes. The cross-section of deformation isolines is $5 \cdot 10^{-6}$. See Fig. 1 for the legend of faults and seismic events. Black circles are small earthquakes. The rectangular coordinates on the frames of the figures are given in the UTM projection in meters.

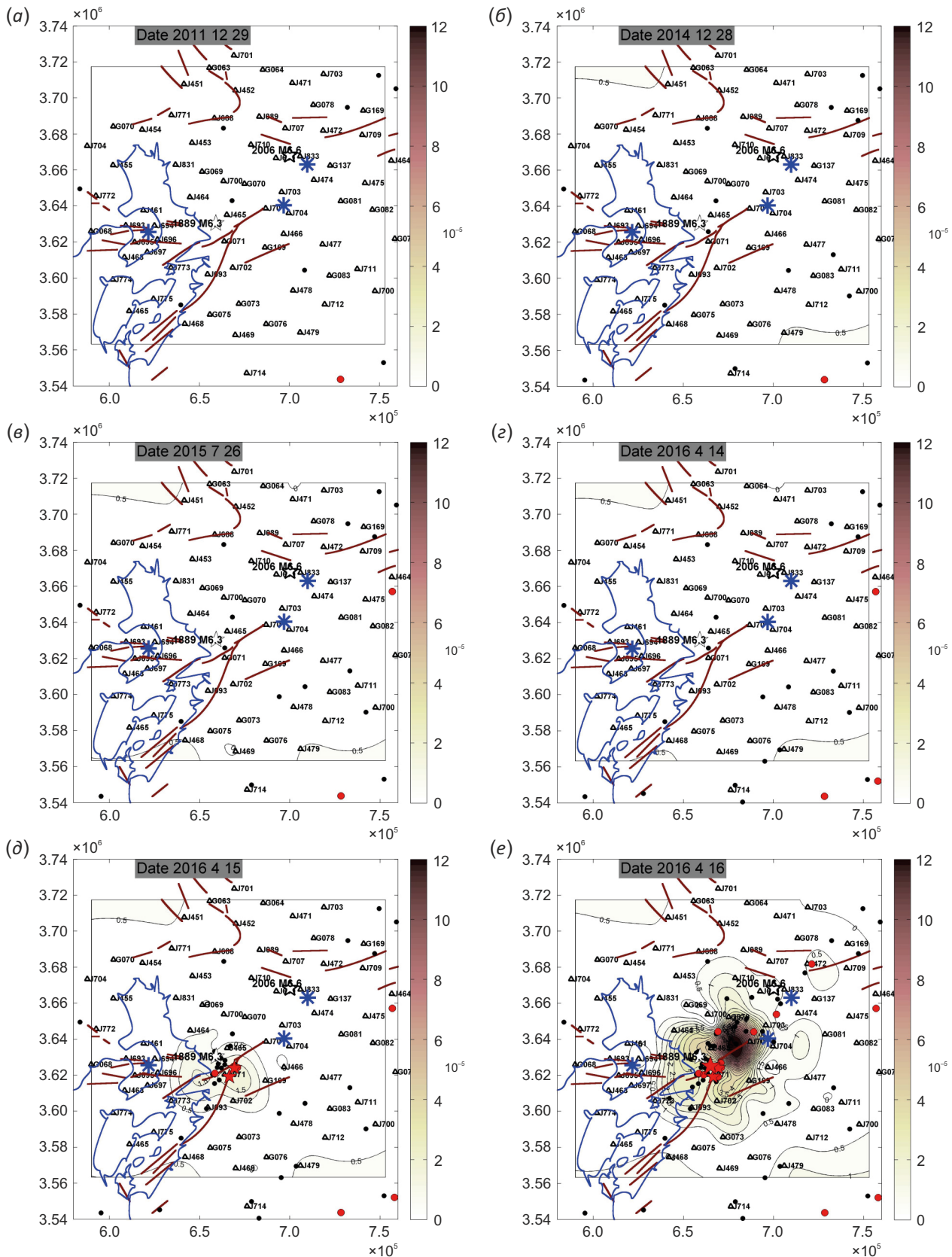


Рис. 5. Распределение накопленной деформации полного сдвига перед землетрясениями Кумамото 2016 г. Сечение изолиний деформации $5 \cdot 10^{-6}$. Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. на рис. 1. Черные окружности – слабые землетрясения. Прямоугольные координаты на рамках рисунков даны в проекции UTM в метрах.

Fig. 5. Distribution of the total shear deformation accumulated before the Kumamoto earthquakes. The cross-section of deformation isolines is $5 \cdot 10^{-6}$. See Fig. 1 for the legend of faults and seismic events. Black circles are small earthquakes. The rectangular coordinates on the frames of the figures are given in the UTM projection in meters.

за сутки перед первым форшоком с М6.4, закономерно направленных на северо-запад. В это время для всей территории преобладают слабые опускания до -0.05 м и столь же маловыраженные поднятия в юго-восточной части района. Эти тенденции не противоречат механизму субдукции Филиппинской плиты. На момент возникновения сильных форшоков (рис. 3, д) вблизи их эпицентров опускания превысили -0.05 м. Векторы горизонтальных смещений незначительно удлинились. Косейсмические горизонтальные и вертикальные смещения за счет главного толчка М7.3 представлены на рис. 3, е. Здесь наиболее интересными фактами явились правосторонний сдвиг по осевой линии разломной зоны Футагава с амплитудой смещений более 1 м и одновременное удаление друг от друга территорий по обе стороны от сейморазрыва на расстояние до 1 м. При этом в центре симметрии полученной картины образовалось поднятие более 0.2 м в соседстве с опусканиями, достигающими -0.2 м по обе стороны поднятия. Экстремумы вертикальных смещений расположились на осевой линии зоны разломов Футагава.

Эволюцию дилатации можно отследить на рис. 4 по нескольким наиболее существенным кадрам деформационного процесса. Как мы видим из рис. 4, а, б, в, г, на протяжении семи лет до главных толчков значительных изменений дилатации не обнаружено. В районе будущих эпицентров за сутки до событий наблюдается незначительное растяжение – менее $5 \cdot 10^{-6}$. На фоне окружающих деформаций трудно делать какие-то выводы о подготовке напряжений в области будущего очага. Косейсмические деформации имеют более выраженный характер. Во время сильных форшоков (рис. 4, д) в эпицентральной зоне сильнейших форшоков очевидна аномалия сжатия более $1 \cdot 10^{-5}$ в соседстве с растяжением такой же величины к юго-западу от эпицентров. Во время возникновения сильнейшего толчка и форшоков в этой области образовалось значительное растяжение – до $1 \cdot 10^{-4}$ и в целом трехполлярное чередование со сжатием до $1.6 \cdot 10^{-4}$ и дальнейшим экстремумом растяжения по линии простираения разломной зоны Футагава. Весьма примечательно то, что эта картина хорошо согласуется с картиной вертикальных движений (см. рис. 3, е). Можно видеть, что поднятия сопровождаются сжатиями, а опускания – растяжениями. Эти особенности демонстрируют механизм некоторого вертикального торшения верхних слоев земной коры за счет остановки бортов разрывной зоны после интенсивного правостороннего сдвига и опускания смежных территорий в условиях их растяжения.

Поведение деформации полного сдвига показано на рис. 5. Очевидно, что до моментов возникновения сильных форшоков накопления существенных сдвиговых деформаций не обнаружено. Их проявление на уровне $5 \cdot 10^{-6}$ имеет место в северо-западной и юго-восточной окраинах исследуемой территории (рис. 5, г). Это представляется закономерным в связи с тенденцией

общего сжатия этой области за счет процесса субдукции тектонических плит. В моменты возникновения сильных форшоков в зоне их эпицентров образовалась деформация (рис. 5, д) на уровне $1.5 \cdot 10^{-5}$. Деформация полного сдвига достигла $1.2 \cdot 10^{-4}$ сразу после главного сейсмического события (рис. 5, е). Но она оказалась не в зоне эпицентров серии Кумамото, а переместилась в северо-восточную часть разломной зоны Футагава, тем самым демонстрируя направление распространения сейсмического разрыва.

5.2. Выявление «запертой» зоны в окрестности образования очага главного сейсмического события

Применение локальной (внутренней) системы отсчета по отношению к накоплению смещений станций ГНСС позволяет обнаруживать зоны минимальных взаимных смещений. Эти зоны маркируют места локально неподвижных участков земной поверхности, характерные для запертых зон сейсмогенерирующих разломов [Kaftan, 2021; Kaftan et al., 2021]. Выявление дефицита смещений на сейсмогенерирующих разломах осуществляется разными авторами с целью установления его наиболее сейсмоопасных участков [Jiang et al., 2015; Wang et al., 2021]. Наблюдения за деформационным процессом на протяжении нескольких лет и десятилетий перед сильными сейсмическими событиями 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 [Reid, 1911; Pevnev, 1988, 1989], местом будущего события можно считать «запертую» зону активного разлома, иначе говоря, зону минимальных деформаций в области подготовки землетрясения. Такую зону в сейсмоактивной области можно картировать по величинам полных смещений пунктов ГНСС, представляющих собой длину векторов горизонтальных смещений. Чем меньше длина вектора смещения, тем менее подвижна земная поверхность территории его расположения. В сейсмоактивной области место минимальных движений, исходя из модели упругой отдачи, является местом максимальных сейсмогенерирующих напряжений.

Эволюция минимальных смещений перед наступлением серии Кумамото показана на рис. 6, а также на соответствующем видео [Kaftan, Shevchuk, 2021]. На протяжении накопления деформации в течение 7.3 лет перед главными сейсмическими событиями в области их будущих эпицентров образовалась зона минимальных смещений – менее 0.02 м. Эти характеристики представляют собой модули векторов накопленных смещений пунктов ГНСС, полученных по формуле:

$$u_i = \sqrt{u_{ni}^2 + u_{ei}^2}.$$

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

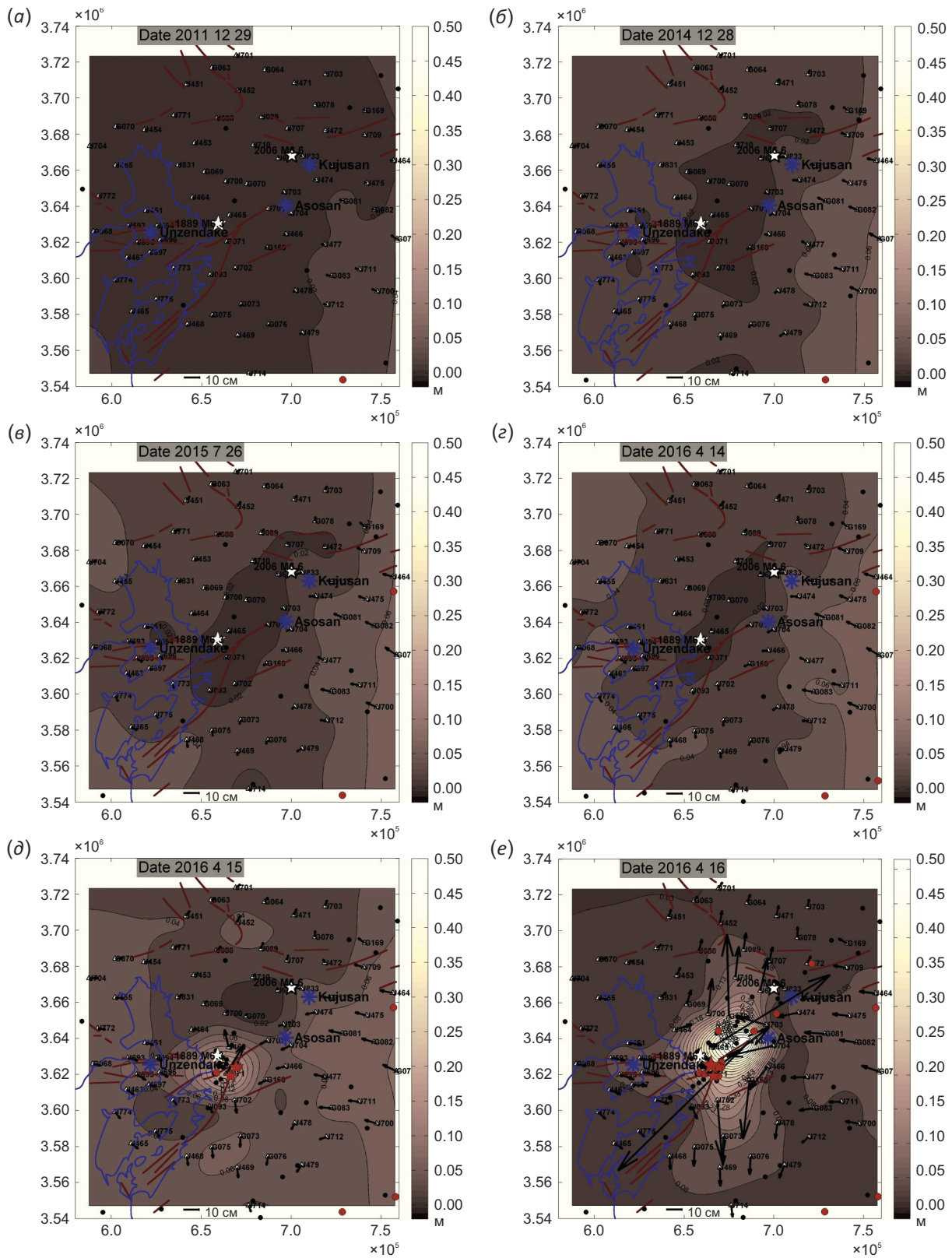


Рис. 6. Распределение накопленных полных смещений перед землетрясениями Кумамото 2016 г. Сечение изолиний полного смещения – 2 см (а, б, в, г, д) и 5 см (е). Стрелки представляют собой векторы горизонтальных смещений пунктов. Легенду разрывных нарушений и сейсмических событий см. на рис. 1. Черные окружности – слабые землетрясения. Прямоугольные координаты на рамках рисунков даны в проекции UTM в метрах.

Fig. 6. Distribution of accumulated total displacements before the 2016 Kumamoto earthquakes. The cross-sections of the total displacement isolines are 2 cm (a, b, v, z, d) and 5 cm (e). Arrows represent vectors of horizontal point displacements. See Fig. 1 for the legend of faults and seismic events. Black spots are small earthquakes. The rectangular coordinates on the frames of the figures are given in the UTM projection in meters.

(рис. 6, д, е). Эти проявления демонстрируют возможность регистрации области ожидания сильных сейсмических событий там, где вследствие землетрясения возникают интенсивные косейсмические сдвиговые деформации земной поверхности. Остается понять, как в таких «напряженных» областях, вытянутых на сотни километров, можно более точно локализовать место будущего сильного события. Заметим, что зона минимальных движений не была стабильной во времени. Она локализовалась постепенно и нарушалась землетрясениями, предшествующими более сильным событиям (рис. 6, д). Это осложняло фиксацию места будущего сильного землетрясения.

6. ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во-первых, хотелось бы обратить внимание на то, что за 127 лет до исследуемой серии сильных сейсмических событий Куамото вблизи их эпицентральной зоны произошло разрушительное землетрясение с М6.3. Это обстоятельство дает основание судить о длительности накопления упругих деформаций перед современными событиями, т.е. об интерсейсмической фазе сейсмического цикла. При этом интервал ГНСС наблюдений движений и деформаций охватывает около 6 % продолжительности всего сейсмического цикла, что, в свою очередь, характеризует степень изученности процесса накопления деформаций перед сильными событиями.

Изучение эволюции движений и деформаций показывает, что существенных изменений в их накоплении на протяжении семи лет перед серией Куамото не обнаруживается. До этих сейсмических событий деформационные предвестники или явно выраженные тренды роста деформационных характеристик не зафиксированы. Наибольший интерес представляет сопоставление характера косейсмических вертикальных движений и дилатации, особенно ярко выраженных в связи с сильнейшим сейсмическим событием (см. рис. 3, е, рис. 4, е). В этой ситуации максимум сжатия совпал с нулевой изолинией перехода от опускания к подъему. Экстремум растяжения в эпицентральной зоне серии Куамото совпал с экстремумом явно выраженного опускания. При этом поднятие совпало с нулевой изолинией перехода от сжатия к растяжению примерно на северо-восточном окончании разломной зоны Фуагава. Следует отметить, что в этом месте в 2014–2016 гг. происходило извержение вулкана Асо-сан с достаточно малым объемом выброшенных материалов. Оно не сопровождалось значимыми вертикальными и горизонтальными движениями в данном районе перед серией сильных событий. Кальдера вулкана оказалась вовлечена в зону интенсивных деформаций, после чего во время постсейсмической релаксации 1 мая 2016 г. извержение прекратилось.

Значительный интерес представляет факт практически полного отсутствия значимых деформаций на протяжении семи лет перед сильными землетрясениями Куамото 2016 г. Как было отмечено выше,

в области подготовки сильных сейсмических событий в зоне контакта Северо-Американской и Тихоокеанской тектонических плит за месяцы и годы до таковых возникают явно выраженные деформационные неоднородности [Kaftan, Melnikov, 2017, 2018, 2019]. В случае с серией Куамото подобных аномалий не обнаружено. На первый взгляд объяснением этой несогласованности является значительное удаление разломов Фуагава и Хинагу от подвижной зоны контакта Филиппинской и Евразийской тектонических плит, где скорость субдукции достигает 6 см/год [Zang et al., 2002]. Они удалены от этой зоны на расстояние около 300 км, тогда как сильнейшие сейсмические события в Южной Калифорнии происходят непосредственно в зоне контакта тектонических плит. Это, по-видимому, объясняет не столь высокую подвижность исследуемой зоны.

Наибольший интерес в отношении развития движений и деформаций в процессе подготовке серии Куамото вызывает поведение минимальных модулей смещений ГНСС пунктов (рис. 6). Анализ кинематики этой характеристики [Kaftan, Shevchuk, 2021] показывает образование локализованной области минимальных смещений (рис. 6, г), в которую попали последующие сильнейшие сейсмические события. Этот факт демонстрирует возможность применения представленной методики для выявления места будущих сильных толчков по данным непрерывных наблюдений густой сети ГНСС.

Все выявленные особенности движений и деформаций характеризуют кинематику "median tectonic line" осевой зоны юго-западной части островной дуги Японского архипелага. Сочетание косейсмических сжатия и подъема в центре образованной триады экстремумов деформации, а также согласованность опусканий с растяжениями на ее краях демонстрируют механизм роста центральной области островной дуги в условиях сжатия и роль вулканизма в этом процессе.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Active Fault Database of Japan, 2021. Available from: <https://gbank.gsj.jp/activefault/index> (Last Accessed December 14, 2021).

- Benz H., 2017. Building a National Seismic Monitoring Center: NEIC from 2000 to the Present. *Seismological Research Letters* 88 (2B), 457–461. <https://doi.org/10.1785/0220170034>.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., 2018. Harnessing the GPS Data Explosion for Inter-Disciplinary Science. *Eos* 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- Dahmen N., Hohensinn R., Clinton J., 2020. Comparison and Combination of GNSS and Strong-Motion Observations: A Case Study of the 2016 M_w 7.0 Kumamoto Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 110 (6), 2647–2660. <https://doi.org/10.1785/0120200135>.
- Global Volcanism Program, 2021. Available from: <https://volcano.si.edu/> (Last Accessed December 14, 2021).
- GSJ Volcanic Hazards Assessment Support System, 2021. http://g-ever1.org/quick/index_en.html (Last Accessed September 14, 2021).
- He P., Wen Y., Xu C., Chen Y., 2019. Complete Three-Dimensional Near-Field Surface Displacements from Imaging Geodesy Techniques Applied to the 2016 Kumamoto Earthquake. *Remote Sensing of Environment* 232, 111321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111321>.
- Jiang G., Xu X., Chen G., Liu Y., Fukahata Y., Wang H., Yu G., Tan X., Xu C., 2015. Geodetic Imaging of Potential Seismogenic Asperities on the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe Fault System, Southwest China, with a New 3-D Viscoelastic Interseismic Coupling Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120 (3), 1855–1873. <https://doi.org/10.1002/2014JB011492>.
- Johnston G., Riddell A., Hausler G., 2017. The International GNSS Service. In: P.J. Teunissen, O. Montenbruck (Eds), *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 967–982. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_33.
- Kaftan V.I., 2021. An Analysis of Ground Movements and Deformations from 13-year GPS Observations before and during the July 2019 Ridgecrest, USA Earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology* 15 (2), 97–106. <https://doi.org/10.1134/S0742046321010115>.
- Kaftan V.I., Kaftan I., Gök E., 2021. Crustal Movements and Deformations in Eastern Turkey in Connection with the Van Earthquake (October 23, 2011, $M_w=7.2$): Study from GPS Data. *Izvestia, Physics of the Solid Earth* 57 (3), 30–44. <https://doi.org/10.1134/S1069351321030071>.
- Kaftan V., Melnikov A., 2017. Local Deformation Precursors of Large Earthquakes Derived from GNSS Observation Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 95 (3), 032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032030>.
- Kaftan V.I., Melnikov A.Yu., 2018. Revealing the Deformational Anomalies Based on GNSS Data in Relation to the Preparation and Stress Release of Large Earthquakes. *Izvestia, Physics of the Solid Earth* 54, 22–32. <https://doi.org/10.1134/S1069351318010093>.
- Kaftan V., Melnikov A., 2019. Migration of Earth Surface Deformation as a Large Earthquake Trigger. In: G. Kocharyan, A. Lyakhov (Eds), *Trigger Effects in Geosystems*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham, p. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_8.
- Kaftan V., Rodkin M., 2019. Earth's Surface Deformation on Mount Etna: GPS Measurements, Interpretation, Relationship to the Mode of Volcanism. *Journal of Volcanology and Seismology* 13, 7–16. <https://doi.org/10.1134/S0742046319010032>.
- Kaftan V., Shevchuk R., 2021. Massing of the Shear Deficit over the Seven Years before the 2016 Kumamoto Earthquake Series: Video. February 2021. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.26662.65607>.
- Kato A., Nakamura K., Hiyama Y., 2016. The 2016 Kumamoto Earthquake Sequence. *Proceedings of the Japan Academy* 92 (8), 358–371. <https://doi.org/10.2183/pjab.92.359>.
- Kawamoto S., Hiyama Y., Ohta Y., Nishimura T., 2016. First Result from the GEONET Real-Timeanalysis System (REGARD): The Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes. *Earth, Planets and Space* 68, 190. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0564-4>.
- Kubodera T., Suzuki T., Masaharu H., Matsuo E., 2017. Analysis on Surface Deformation and Cracks in Paddy Fields by 2016 Kumamoto Earthquake Using GNSS and Photogrammetry. *International Journal of Environmental and Rural Development* 8 (1), 85–92. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-143-2017>.
- Moore J., Yu H., Tang C., Wang T., Barbot S., Peng D., Masuti S., Dauwels J. et al., 2017. Imaging the Distribution of Transient Viscosity after the 2016 M_w 7.1 Kumamoto Earthquake. *Science* 356 (6334), 163–167. <https://doi.org/10.1126/science.aal3422>.
- Nakajima J., Hasegawa A., 2007. Subduction of the Philippine Sea Plate beneath Southwestern Japan: Slab Geometry and Its Relationship to Arc Magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112 (B8). <https://doi.org/10.1029/2006JB004770>.
- Pevnev A.K., 1988. Earthquake Prediction: Geodetic Aspects of the Problem. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 12, 88–98.
- Pevnev A.K., 1989. Deterministic Geodetic Prediction of Preparation Areas of Strong Crustal Earthquakes. *Earthquake Prediction* 11, 11–23.
- Reid H.F., 1911. The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes. *Bulletin of the Department of Geology* 6, 413–444.
- Riznichenko Yu.V., 1992. *Problems of Seismology: Selected Papers*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 445.
- Sagiya T., 2004. A Decade of GEONET: 1994–2003. The Continuous GPS Observation in Japan and Its Impact on Earthquake Studies. *Earth Planets Space* 56 (8), XXIX–XLI. <https://doi.org/10.1186/BF03353077>.
- Tanaka Y., Ohta Y., Miyazaki S., 2019. Real-Time Coseismic Slip Estimation via the GNSS Carrier Phase to Fault Slip Approach: A Case Study of the 2016 Kumamoto Earthquake. *Geophysical Research Letters* 46 (3), 1367–1374. <https://doi.org/10.1029/2018GL080741>.
- Wang K., Zhu Y., Nissen E., Shen Z.-K., 2021. On the Relevance of Geodetic Deformation Rates to Earthquake Potential.

Geophysical Research Letters 48 (11), e2021GL093231. <https://doi.org/10.1029/2021GL093231>.

Wu J.C., Tang H.W., Chen Y.Q., Li Y.X., 2006. The Current Strain Distribution in the North China Basin of Eastern China by Least-Squares Collocation. *Journal of Geodynamics* 41 (5), 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.01.003>.

Yamagiwa S., Miyazaki S., Hirahara K., Fukahata Y., 2015. Afterslip and Viscoelastic Relaxation Following the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (M_w 9.0) Inferred from Inland GPS and Seafloor GPS/Acoustic Data. *Geophysical Research*

Letters 42 (1), 66–73. <https://doi.org/10.1002/2014GL061735>.

Yang Y., Qin X., 2021. Resilient Observation Models for Seafloor Geodetic Positioning. *Journal of Geodesy* 95, 79. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01531-7>.

Zang S.X., Chen Q.Y., Ning J.Y., Shen Z.K., Liu Y.G., 2002. Motion of the Philippine Sea Plate Consistent with the NUVEL-1A Model. *Geophysical Journal International* 150 (3), 809–819. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01744.x>.