



DEFORMATION INTERACTION OF STRONG EARTHQUAKES OF 2010–2016 IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE HIKURANGA SUPERPLUME (NEW ZEALAND) ACCORDING TO GPS OBSERVATIONS

V.I. Kaftan ^{1✉}, P.A. Dokukin ², A.I. Manevich ¹, V.N. Tatarinov ^{1,3}, R.V. Shevchuk ^{1,3}

¹ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 3 Molodezhnaya St, Moscow 119296, Russia

² Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 6 Miklukho-Maklay St, Moscow 117198, Russia

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT. Between 2010 and 2016, a series of 11 strong $M > 6$ earthquakes occurred in New Zealand. In the area covering the epicentral zones of these seismic events, the spatiotemporal characteristics of movements and deformations of the Earth's crust were obtained based on the processing of continuous satellite GPS observations at 64 points of the geodetic network. Using these data, we have studied the evolution of horizontal movements and deformations in order to reveal the possible relationship between the observed deformational and seismic processes. Analysis has been made on the total shear deformation, since the main tectonic structures of the region are faults with a shear mechanism of displacement of their sides. The presence of a giant mantle superplume in the area was the reason for the study of the behavior of horizontal dilatation deformation, and horizontal and vertical crustal motions. Based on the obtained digital deformation models, there were created kinematic visualizations, which are synoptic animations providing direct observations of the seismic deformation process and their heuristic analysis. The study revealed that a series of the strongest earthquakes may be interconnected by a long-term single deformation process, which is caused by the occurrence of an anomalous total shear deformation. The general maximum of shear deformation, dilatation deformation, and horizontal and vertical displacements are concentrated in the center of mantle superplume activity. Prior to strong seismic events, there occur zones of deficit (minimum) displacements of the Earth's crust in the area of future epicenters, which is of research interest in terms of predicting their locations.

KEYWORDS: crustal movements; total shear deformation; earthquake; superplume; GPS; synoptic animation; inner displacement deficit; aftershock; coseismic displacements

FUNDING: This work was conducted as part of the state assignment of the Geophysical Center of RAS, approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.



EDN: IJXYVR

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Vladimir I. Kaftan, v.kaftan@gcras.ru

Received: March 9, 2023

Revised: July 11, 2023

Accepted: July 12, 2023

FOR CITATION: Kaftan V.I., Dokukin P.A., Manevich A.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V., 2024. Deformation Interaction of Strong Earthquakes of 2010–2016 in the Zone of Influence of the Hikuranga Superplume (New Zealand) According to GPS Observations. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0735. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0735

English version: see article page online

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2010–2016 гг. В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛЮМА ХИКУРАНГИ (НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ) ПО ДАННЫМ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

В.И. Кафтан¹, П.А. Докукин², А.И. Маневич¹, В.Н. Татаринцов^{1,3}, Р.В. Шевчук^{1,3}

¹ Геофизический центр РАН, 119296, Москва, ул. Молодежная, 3, Россия

² Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. С 2010 по 2016 г. на территории Новой Зеландии произошла серия из 11 сильных землетрясений $M > 6$. В области, охватывающей эпицентральные зоны этих сейсмических событий, на основе данных непрерывных спутниковых GPS-наблюдений на 64 пунктах геодезической сети получены пространственно-временные характеристики движений и деформаций земной коры. По ним было выполнено исследование эволюции горизонтальных движений и деформаций с целью выявления возможной взаимосвязи наблюдаемых деформационных и сейсмических процессов. Анализу была подвергнута деформация полного сдвига, так как основные тектонические структуры региона представляют собой разломы со сдвиговым механизмом смещения их бортов. Присутствие в данном районе гигантского мантийного суперплюма послужило причиной исследования поведения горизонтальной деформации дилатации, горизонтальных и вертикальных движений земной коры. На основании полученных цифровых моделей деформаций были сформированы кинематические визуализации, представляющие собой синоптические анимации, обеспечивающие прямые наблюдения за сейсмодеоформационным процессом и их эвристический анализ. В результате исследования было установлено, что серии сильнейших землетрясений могут быть взаимосвязаны длительным во времени единым деформационным процессом, начало которого обусловлено образованием аномальной деформации полного сдвига. Концентрация генерального максимума сдвиговой деформации, деформации дилатации, горизонтальных и вертикальных смещений сосредоточена в центре активности мантийного суперплюма. Перед сильными сейсмическими событиями в области будущих эпицентров возникают зоны дефицита (минимума) смещений земной коры, что представляет интерес для исследований в области прогноза мест возникновения сильных землетрясений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: движения земной коры; деформация полного сдвига; землетрясение; суперплюм; GPS; синоптическая анимация; дефицит внутренних смещений; афтершок; косейсмические смещения

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В текущем столетии в эволюции сейсмической активности Земли произошло интересное событие. С 2010 по 2016 г. Новая Зеландия испытала беспрецедентную серию сильных землетрясений $M > 6$. В районе исследований произошло 11 таких сейсмических событий. Среди них были два сильнейших: землетрясения Кайкоура ($M 7.8$, 13 ноября 2016 г.) и Дарфилд ($M 7.1$, 3 сентября 2010 г.). Землетрясение Кайкоура по магнитуде приближается к мегаземлетрясениям по качественной шкале Рихтера. Многие землетрясения с магнитудой $M 6$ и более были индуцированы сильнейшими событиями, т. е. оказались их афтершоками. Наиболее примечательными из последних являлись землетрясения в проливе Кука ($M 6.5$, июль – август 2013 г.), так как в их эпицентральных зонах после сильнейшего землетрясения Кайкоура (2016 г.) произошли перемещения, в несколько раз превышающие собственные косейсмические смещения 2013 г. Особое место занимают два неожиданных события: землетрясение $M 6.1$ от 24 апреля 2015 г., предшествующее землетря-

сению Кайкоура и произошедшее на разломе Кларенс, явно не связанном с сейсмическим разрывом этого сильнейшего землетрясения, и землетрясение 20 января 2014 г., самое удаленное от главного события на расстояние порядка 100 км, но произошедшее на том же разломе, к которому приурочены сильные землетрясения в проливе Кука. Это может указывать на генетическую связь этих событий. При этом в период с 2008 по 2021 г. произошло более 80 землетрясений с $6 \leq M \leq 5$.

Исторические исследования сейсмической и геодинамической активности сосредоточены главным образом на раздельном изучении трех разрозненных серий сильнейших событий. Это исследования движений земной коры в районе сильнейшего землетрясения Кайкоура ($M 7.8$) [Shi et al., 2019; Wang et al., 2018; Ulrich et al., 2019] в связи с серией землетрясений в районе Кентербери в 2010–2011 гг. [Kaiser et al., 2012; Toraldo Serra et al., 2013; Ristau, 2010; Beavan et al., 2012], в районе серии сильных событий в проливе Кука в июле – августе 2013 г. [Hamling et al., 2014].

Постсейсмические движения и деформации в связи с землетрясением Кайкоура детально изучены в работе [Jiang et al., 2018].

В настоящем исследовании решалась задача изучения эволюции деформаций земной коры в более обширной, чем в других исследованиях, области, охватывающей эпицентральные зоны всех указанных сильнейших сейсмических событий, на более продолжительном временном интервале с целью выявления возможной взаимосвязи наблюдаемых деформационных процессов.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ, ТЕКТНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Для определения движений и деформаций земной коры был использован фрагмент из 64 пунктов постоянно действующей GPS-сети Новой Зеландии (рис. 1). Сеть создана в результате взаимодействия трех государственных ведомств: Сейсмологической комиссии (<https://www.eqc.govt.nz/about-eqc/>), Института геоло-

гии и ядерной физики (<https://www.gns.cri.nz/about-us/>) и Земельного агентства (<https://www.linz.govt.nz/about-us>). Непрерывно действующие GPS-станции функционируют в составе комплексной сети геофизических наблюдений GeoNet. Данные наблюдений и метаданные предоставляются пользователям открыто и бесплатно [GNS Science, 2019].

Для вычисления горизонтальных деформаций конечных элементов использованы треугольники триангуляции Делоне. Временные ряды ежесуточных определений координат пунктов были получены из архива Геодезической лаборатории Невады [Blewitt et al., 2018].

Начальная и конечная эпохи измерений равны 01.01.2008 и 25.06.2021 соответственно. Общее число суток определения координат пунктов и полей деформации – 4925.

Следует заметить, что сеть непрерывных ГНСС-измерений весьма неоднородна по плотности площадного распределения пунктов наблюдений (рис. 1).

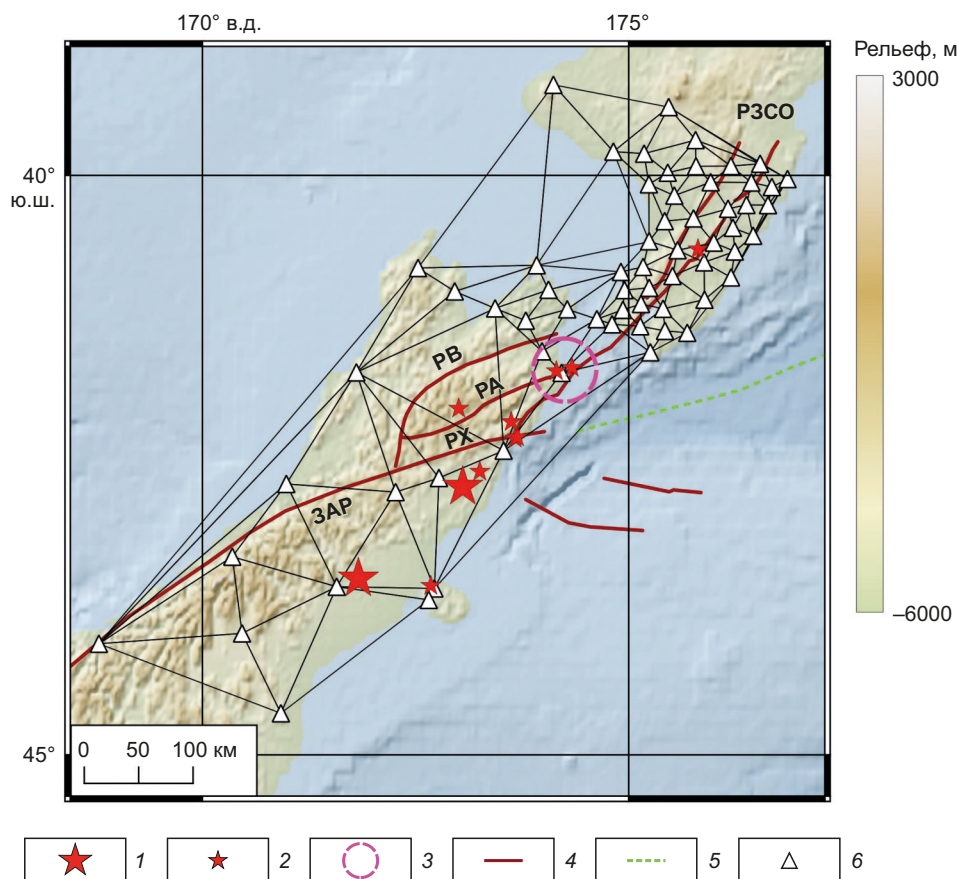


Рис. 1. Используемая при анализе GPS-сеть.

1 – сильнейшие землетрясения $M > 7$; 2 – землетрясения $7 > M \geq 6$; 3 – зона тройного сочленения Кайкоура (КТТ) [Shi et al., 2019]; 4 – осевые линии важнейших разломных зон; 5 – глубоководный желоб зоны субдукции Хикуранги; 6 – пункты наблюдательной сети. ЗАР – зона Альпийского разлома, РХ – разлом Хопе, РА – разлом Аватере, РВ – разлом Вайрау, РЗСО – зона разломов Северного острова.

Fig. 1. GPS network used for analysis.

1 – strongest $M > 7$ earthquakes; 2 – $7 > M \geq 6$ earthquakes; 3 – Kaikoura triple junction zone (KTJ) [Shi et al., 2019]; 4 – axial lines of the most significant fault zones; 5 – ocean trench of the Hikurangi subduction zone; 6 – sites of observation network. 3AP – Alpine fault zone, PX – Hopé fault, PA – Avatere fault, PB – Wairau fault, P3CO – North Island fault zone.

Северный остров обладает существенно большим их количеством, чем Южный. Это обстоятельство уменьшает пространственное разрешение полей движений и деформаций для территории Южного острова.

Для определения положения главных разломных зон использована база данных из статьи [Langridge et al., 2016].

Тектоника региона представляется весьма интересной и необычной. Здесь зона субдукции, выраженная глубоководным желобом Хикуранги, соединяется с разломами континентального сдвигового типа – Альпийским разломом Южного острова (ЗАР) и его продолжением в системе разломов Северного острова (РЗСО). Эта область представляет собой тройное сочленение Хикуранги (рис. 2). Разломы РХ, РА и РВ формируют систему разломов Марлборо. Основным источником тектонических движений здесь является сближение Тихоокеанской и Австралийской плит, обуславливающее субдукцию в районе Северного острова. Океаническая литосфера Тихого океана круто погружается под континентальную Австралийскую плиту с весьма высокой скоростью – около 41 мм/год. Эта область фиксирует переход от процесса субдукции к механизму правостороннего сдвига по простираанию осевой зоны границы тектонических плит со скоростью около 37 мм/год, выраженному Альпийским разломом Южного острова и системой разломов Северного острова. Серия субпараллельных разломов на севере Южного острова представляет разломную область

Марлборо, простирающуюся в акваторию пролива Кука, тектонические особенности которой демонстрируют переход от субдукции к сдвигу. Зона тройного сочленения Кайкоура маркирует южное окончание океанического плато, которое, как полагают авторы работы [Shi et al., 2019], мигрирует на юг. Эта область представляет собой южный угол океанического плато Хикуранги, смещающегося на юг и покрывающего недавно открытый гигантский мантийный суперплюм Хикуранги [Stern et al., 2020]. Последнее обстоятельство позволяет предполагать наличие здесь вертикально восходящего мантийного потока, образующего радиальные мантийные подкоровые течения от центра к периферии области плюма, где толщина океанической коры оценивается величиной 10 км [Shi et al., 2019].

Характер тектонических взаимодействий в районе исследований обобщенно представлен в работе [Shi et al., 2019]. Главные элементы разломной тектоники показаны на рис. 2. Важно то, что эволюция современных движений и деформаций земной поверхности данного региона отражает его тектонические особенности.

Информация о сейсмической активности региона с 2008 по 2021 г. получена из базы данных NEIC (National Earthquake Information Center <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>). Сильнейшие землетрясения за указанный интервал времени представлены в табл. 1.

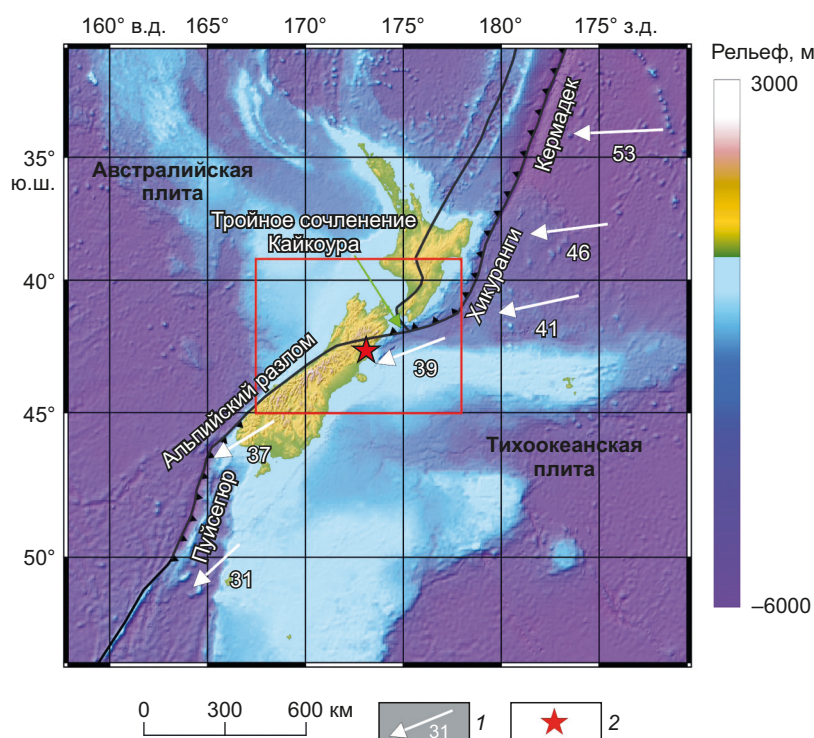


Рис. 2. Тектонические условия в зоне тройного сочленения Кайкоура. 1 – направления горизонтальных движений плит; 2 – эпицентр сильнейшего землетрясения Кайкоура.

Fig. 2. Tectonic conditions in the Kaikoura triple junction zone. 1 – directions of horizontal plate motions; 2 – epicenter of the strongest Kaikoura earthquake.

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения с 2010 по 2016 г.**Table 1.** The strongest earthquakes between 2010 and 2016

Название землетрясения	Дата (день, мес., год)	Время (ч, мин, с)	Географические координаты (град.)		Глубина (км)	M_w
			Широта	Долгота		
Дарфилд	03.09.2010	16:35:47.770	-43.5220	171.8300	12	7.1
Кристчёрч	21.02.2011	23:51:42.350	-43.5830	172.6800	5.9	6.1
Седдон	21.07.2013	05:09:31.450	-41.7040	174.3370	17	6.5
	16.08.2013	02:31:05.750	-41.7340	174.1520	8.2	6.5
Екетахуна	20.01.2014	02:52:44.350	-40.6595	175.8144	28	6.1
	24.04.2015	03:36:42.400	-42.0602	173.0066	48	6.1
Кайкоура	13.11.2016	11:02:56.340	-42.7373	173.0540	15.11	7.8
	13.11.2016	11:32:06.540	-42.3205	173.6694	10	6.5
	13.11.2016	11:52:45.010	-42.1762	173.6227	13.99	6.1
	13.11.2016	13:31:25.660	-42.3093	173.6961	2.09	6.2
	14.11.2016	00:34:22.610	-42.6058	173.2543	9	6.5

3. СТРАТЕГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Сегодня на территории земного шара функционирует около 20 тыс. постоянно действующих станций ГНСС, наблюдения на которых продолжаются десятки лет. В открытом доступе предоставляются временные ряды точных (сантиметровая точность) координат наблюдательных пунктов, полученных по суточным непрерывным наблюдениям [Blewitt et al., 2018]. 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.

По изменениям плановых координат u_n и u_e (оси n и e направлены на север и восток) вычислялись компоненты тензора горизонтальной деформации:

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix}, \text{ элементы которого } \varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}, \varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e} \text{ и}$$

$$\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right) \text{ соответственно, где } \frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} =$$

$$= \gamma_{ne} = \gamma_{en} - \text{относительный сдвиг.}$$

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 тектонических плит, где преобладают деформации сдвига по простиранию сейсмогенерирующих, выходящих на дневную поверхность, разломов, авторами рассчитывались и подвергались анализу деформации полного сдвига $\gamma = ((\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2)^{1/2}$. Присутствие в данном районе гигантского суперплюма побудило авторов также изучить поведение вертикальных движений земной коры и деформации дилатации $\Delta = \varepsilon_n + \varepsilon_e$. Компоненты деформаций вычис-

лялись согласно методу, описанному в статье [Wu et al., 2006].

Вычислялись и анализировались так называемые «внутренние» смещения земной поверхности [Gvishiani et al., 2022], в понятиях классической механики, соответствующие внутренним силам, не зависящим от внешних сил.

По отношению к начальной эпохе измерений $i=0$, как разности координат n и e по каждой из горизонтальных осей вычислялись накопленные горизонтальные смещения U_n и U_e :

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

где i – текущая эпоха измерений (порядковый номер суток от начала наблюдений). Внутренние смещения, накопленные от начальной эпохи, вычислялись по формуле:

$$u_{nj} = U_{nj} - \bar{U}_n, u_{ej} = U_{ej} - \bar{U}_e,$$

где $\bar{U}$ – средние значения смещений по осям прямоугольных координат на каждые сутки, j – порядковый номер пункта GPS-наблюдений.

Цифровые пространственные модели накопленных горизонтальных деформаций и движений земной коры были получены на каждые сутки по отношению к начальной эпохе 01.01.2008. При этом технические перерывы в наблюдениях устранялись интерполяцией сплайнами Эрмита. Пространственное интерполирование величин движений и деформаций на регулярную сетку также осуществлялось с помощью Эрмитовых сплайнов.

На основании полученных цифровых моделей создавались графические изображения, соответствующие каждому суткам. Они представляли собой кадры, объединяемые в единую синоптическую анимацию сейсмореформационного процесса. На кадрах также, согласно времени их возникновения, отображались

эпицентры землетрясений магнитудой $M > 3$. Каталог сейсмических событий был получен из базы данных NEIC.

Полученные кинематические визуализации данных обеспечили прямые наблюдения за сейсмодформационным процессом и их эвристический анализ. Соответствующие видеоанимации размещены на научном информационном ресурсе «Earth Science Data Base» Геофизического центра РАН (<http://esdb.wdcb.ru/>). Прямые ссылки на расположение синоптических анимаций приведены ниже в соответствующих разделах статьи.

4. ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛНОГО СДВИГА

Рассмотрим последовательность ключевых кадров построенной синоптической анимации [Dokukin et al., 2023a] эволюции деформации полного сдвига (рис. 3). Первый кадр (рис. 3, а) демонстрирует развитие аномальной зоны деформации полного сдвига примерно за три года с момента начала регистрации именно в области возникновения будущего сильного землетрясения Дарфилд (рис. 3, б). Ее величина достигает $2 \cdot 10^{-6}$, что на порядок превышает точность определения деформации 10^{-7} . Примерно через три месяца в заливе Пегасус произошла серия умеренных и сильного афтершоков ($M_w = 5.9-6.2$) на продолжении активного разлома, вблизи которого зарегистрировано сильнейшее землетрясение Дарфилд $M_w = 7.1$. В совокупности с землетрясением Дарфилд эта последовательность сейсмических событий именуется серией Кентерберри (рис. 3, б). При этом примечательно то, что аномалия деформации полного сдвига возросла до 10^{-5} , что характерно для уровня косейсмических деформаций, и переместилась на север именно в область тройного сочленения Кайкоура, вблизи которого через 2.5–3.0 года происходят сильные землетрясения в проливе Кука и в районе оз. Грессмер (рис. 3, г). Из них два сильнейших с $M 6.6$ произошли в июле – августе 2013 г. Эти землетрясения приурочены к разломной области Марлборо, продолжением которой в северном направлении является зона разломов Северного острова. Здесь при отсутствии значимых сдвиговых деформаций (рис. 3, е) происходит сильное землетрясение с $M 6.1$. Описание этого события, удаленного от большинства очагов сильнейших землетрясений, авторы статьи не обнаружили в научных публикациях. Примечательно то, что оно не привело к ощутимым косейсмическим горизонтальным смещениям земной поверхности. Его приуроченность к разломной зоне, на южном окончании которой произошла серия сильных и умеренных землетрясений, позволяет отнести его к совокупности сильнейших взаимосвязанных землетрясений исследуемого периода.

Примерно через два года, 24.04.2015 г., в районе разлома Аватере происходит землетрясение с $M 6.1$. Через полтора года, 13.11.2016–14.11.2016 г., в области деформаций полного сдвига порядка 10^{-5} и более происходит сильнейшее землетрясение Кайкоура ($M 7.8$) и

три сильных афтершока с $M 6.2-6.5$ (рис. 3, з), при этом два из них – в области тройного сочленения Кайкоура у полуострова Кайкоура.

Здесь они в совокупности с множественными умеренными событиями вызывают деформацию полного сдвига порядка $2 \cdot 10^{-4}$. Эти события произошли с задержками от 30 мин до 12 ч после главного толчка на удалении от 16 до 30 км. При этом в области эпицентра землетрясения Кайкоура деформация достигла всего лишь $4 \cdot 10^{-5}$, т.е. является на порядок меньшей. Это согласуется с положениями тектонофизической модели метастабильного состояния Ю.Л. Ребецкого [Rebetsky, 2018], в которой интенсивность движений бортов протяженного сейсморазрыва в случае сильнейшего землетрясения возрастает по отношению к егоначальному уровню во время главного толчка.

Подобная серия сильных землетрясений в ограниченной области является беспрецедентным событием. Приуроченность событий к территории недавно обнаруженного мантийного суперплюма и концентрация максимума сдвиговой косейсмической деформации именно в этом месте позволяют предполагать обусловленность сейсмического процесса неглубоким расположением вязкого мантийного слоя и его восходящего потока с радиальным центростремительным горизонтальным растеканием [Shi et al., 2019].

5. АНАЛИЗ ДЕФИЦИТА ВНУТРЕННИХ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Высокая сейсмическая активность в ограниченной области вызвала интерес к анализу такого предвестника их места, как наличие дефицита внутренних смещений земной коры. Эта характеристика, отражающая пространственную динамику изменения абсолютных значений смещений GPS-пунктов, изучается в лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН в последние годы [Gvishiani et al., 2022]. Под дефицитом смещений подразумеваются области их минимальных значений, не превышающих или незначительно превышающих точность их определения. Как правило, это области значений модуля вектора внутренних смещений, не превышающих 0.02 м.

Места дефицита внутренних движений земной коры соотносятся с местами значительного уплотнения пород за счет высоких напряжений в земной коре перед сильными сейсмическими событиями. Серия сильных землетрясений, произошедших в Новой Зеландии в пределах непрерывнодействующей GPS-сети, предоставила возможность выявления таких зон малых внутренних движений.

Накопление дефицита смещений перед землетрясениями Дарфилд и Крисчерч в декабре 2010 и в феврале – июне 2011 г. (район Кентерберри) представлено на кадрах рис. 4. Далее на всех кадрах зоны дефицита движений показаны темно-коричневыми областями. На первом кадре (рис. 4, а) видна область концентрации дефицита движений, в которую впоследствии попадает землетрясение Дарфилд с $M 7.1$ (рис. 4, б). Иными

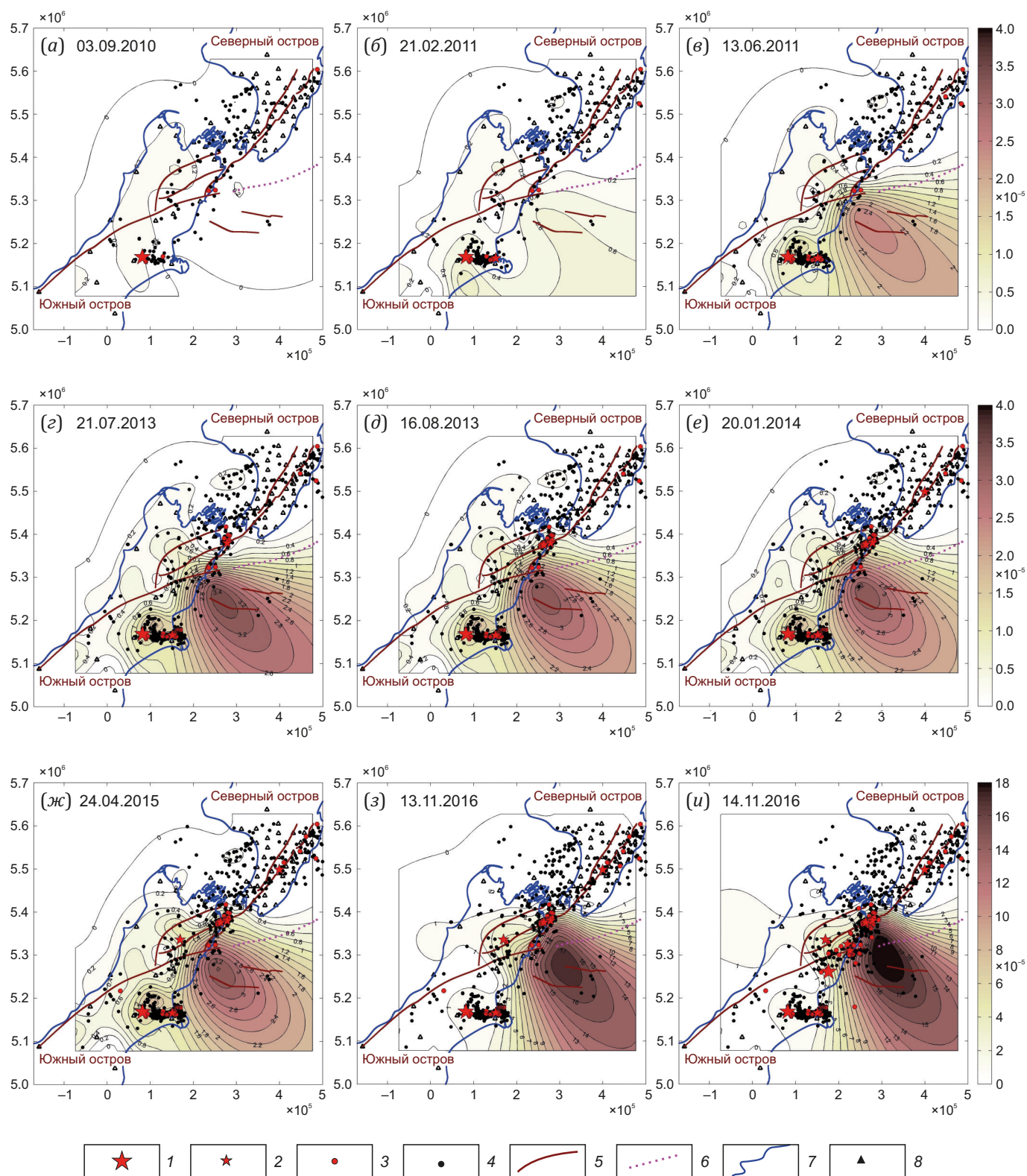


Рис. 3. Эволюция деформации полного сдвига в связи с ходом сейсмической активности в районе сильных землетрясений Новой Зеландии 2008–2021 гг. 1 – эпицентры землетрясений $M > 7$; 2 – эпицентры землетрясений $5.9 < M < 7$; 3–4 – эпицентры землетрясений $4.9 < M < 6$ (3), $2.5 < M < 5$ (4); 5 – осевые линии разломных зон; 6 – глубоководный желоб; 7 – береговая линия; 8 – пункты GPS.

Fig. 3. Evolution of the total shear deformation in relation to seismic activity in the area of strong New Zealand earthquakes in 2008–2021. 1 – epicenters of $M > 7$; 2 – epicenters of $5.9 < M < 7$; 3–4 – epicenters of $4.9 < M < 6$ (3), $2.5 < M < 5$ (4); 5 – axial lines of fracture zones; 6 – deep sea trench; 7 – coastline; 8 – GPS points.

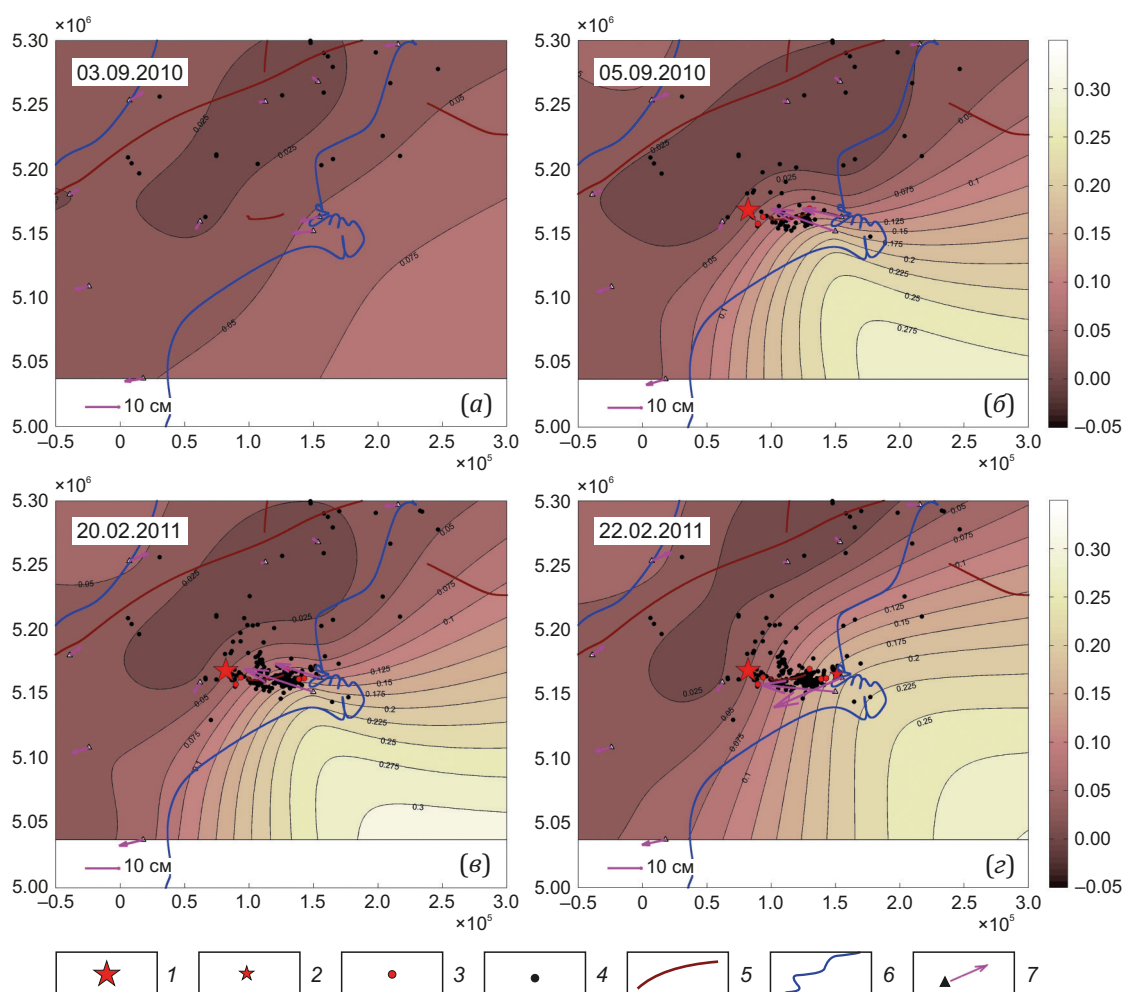


Рис. 4. Дефицит внутренних смещений в связи с землетрясениями в районе Кентербери. Обозначения см. на рис. 3. Подписи и шкалы изолиний представлены в метрах. Стрелками показаны смещения.

Fig. 4. Inner displacement deficit due to earthquakes in the Canterbury area. See Fig. 3 for notations. Legends and scales to isolines are presented in meters. The arrows show the displacements.

словами, землетрясение совпало с границей области минимальных движений, что согласуется, например, с другими исследованиями [Rebetsky, 2018; Guo et al., 2022], в которых предполагается, что многие сильные землетрясения происходят в зонах минимальных движений или на границах перехода от таковых к зонам относительно быстрых движений. При этом в работе [Rebetsky, 2018] утверждается, что в областях максимальных упругих напряжений возникают не самые сильные землетрясения. В данном случае это области минимума внутренних движений. Следует отметить, что это место будущего эпицентра землетрясения Дарфилд перекрывает уже «ощутимая» аномалия горизонтальной деформации полного сдвига (см. рис. 3, а).

Перед очередным сильным событием с M6.2 в зоне его будущего эпицентра (рис. 4, г) медленные внутренние движения не регистрируются (рис. 4, в). Именно эта зона вблизи залива Пегасус активизировала движения с момента сильнейшего землетрясения Дарфилд M7.1 (рис. 4, б). Это обстоятельство свидетельствует в пользу предположения, что землетрясения

в этом месте являются афтершоками землетрясения Дарфилд, несмотря на их примерно полугодовую задержку по времени. Так же, как и в случае землетрясения Кайкоура M7.8, максимальные смещения удалены от очага сильнейшего события данного региона. Они тоже происходят вблизи морской акватории, что можно объяснить уменьшенным уровнем трения по разрыву из-за присутствия флюида.

Следующей серией разрушительных землетрясений стали сильные события M6.5 и умеренные афтершоки в проливе Кука и в районе оз. Герсмер. Соответствующие кадры распределения интенсивности накопленных перед событиями внутренних смещений представлены на рис. 5. Кадры на рис. 5, а, б, показывают, что землетрясения возникли на осевой линии области минимальных смещений, направленной с юго-запада на северо-восток. Тем не менее накопленные смещения здесь уже достигали 5 см, что не дает достаточного основания относить эту территорию к зоне максимального дефицита смещений, т.е. зоне наивысших напряжений. Кадры косейсмических смещений

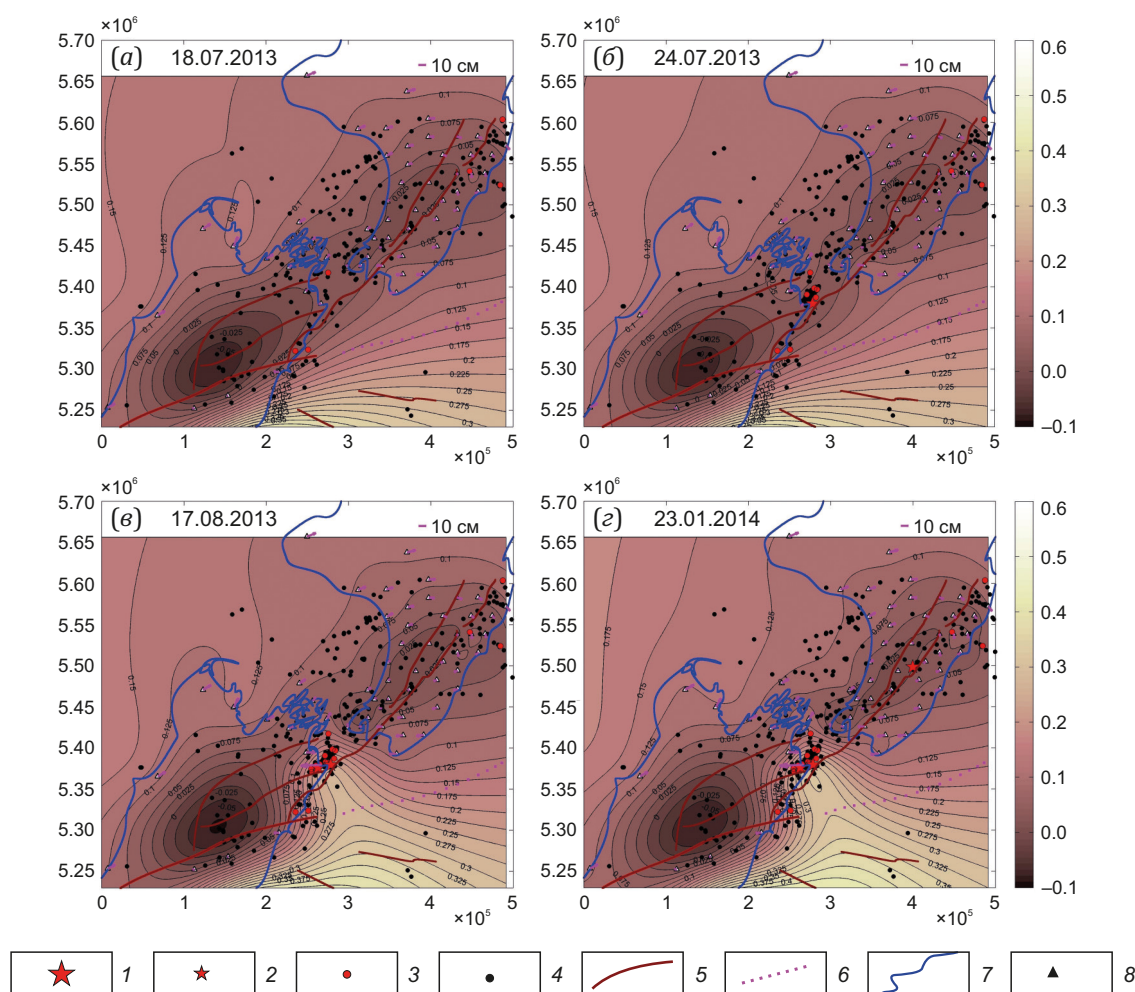


Рис. 5. Дефицит внутренних смещений земной коры в связи с землетрясениями в проливе Кука. Обозначения см. на рис. 3. Подписи и шкалы изолиний представлены в метрах. Стрелками показаны смещения.

Fig. 5. Crustal inner displacement deficit due to earthquakes in the Cook Strait. See Fig. 3 for notations. Legends and scales to isolines are presented in meters. The arrows show the displacements.

после этих событий (рис. 5, в, г) свидетельствуют о том, что землетрясения в своих эпицентральных зонах разрядили накопленные напряжения и инициировали смещения, достигающие 0.3 м, что характерно для землетрясений с $M \sim 6$.

Синоптический анализ внутренних движений до и после сильнейшего землетрясения Кайкоура с $M 7.8$ (события с магнитудой $M 8$ относятся к мегаземлетрясениям по качественной шкале Рихтера) представлен на рис. 6. Данные кадры показывают, что землетрясение произошло, как и в случае с событием Дарфилд, на изолинии, оконтуривающей зону минимальных смещений, залитую темно-коричневым цветом. Крайне интересным обстоятельством при этом является то, что в результате сильнейшего землетрясения максимальные косейсмические смещения не произошли в эпицентре события, а переместились на северо-восток на расстояние около сотни километров в ослабленную зону, где до этого произошли сильные события в проливе Кука и возле оз. Герсмер (рис. 6, г, большие фиолетовые стрелки).

Следует отметить, что авторы настоящего исследования не встречали такой ситуации при анализе движений и деформаций земной коры в связи с другими сильными коровыми землетрясениями. Обычно максимальные косейсмические смещения происходят непосредственно в эпицентрах сильных событий с $M > 6$, т.е. разрыв выходит на поверхность и начинается от области гипоцентра. Потом в процессе релаксации он развивается вдоль вспарываемого разрыва. В случае землетрясения Кайкоура, по-видимому, вспарывание началось в более ослабленной и уже нарушенной зоне, в составе сложной совокупности косейсмических разрывов, о которой уже многократно говорилось в научных публикациях [Wang et al., 2018; Ulrich et al., 2019; Jiang et al., 2018], т.е. максимальное сотрясение не совпало территориально с максимальным поверхностным разрывом. Сам разрыв при этом произошел в зоне тройного сочленения Кайкоура и фокусе влияния мантийного суперплюма. Можно предположить, что разрыв начался в глубинной фокальной и эпицентральной зоне, но вышел на поверхность и увеличился на

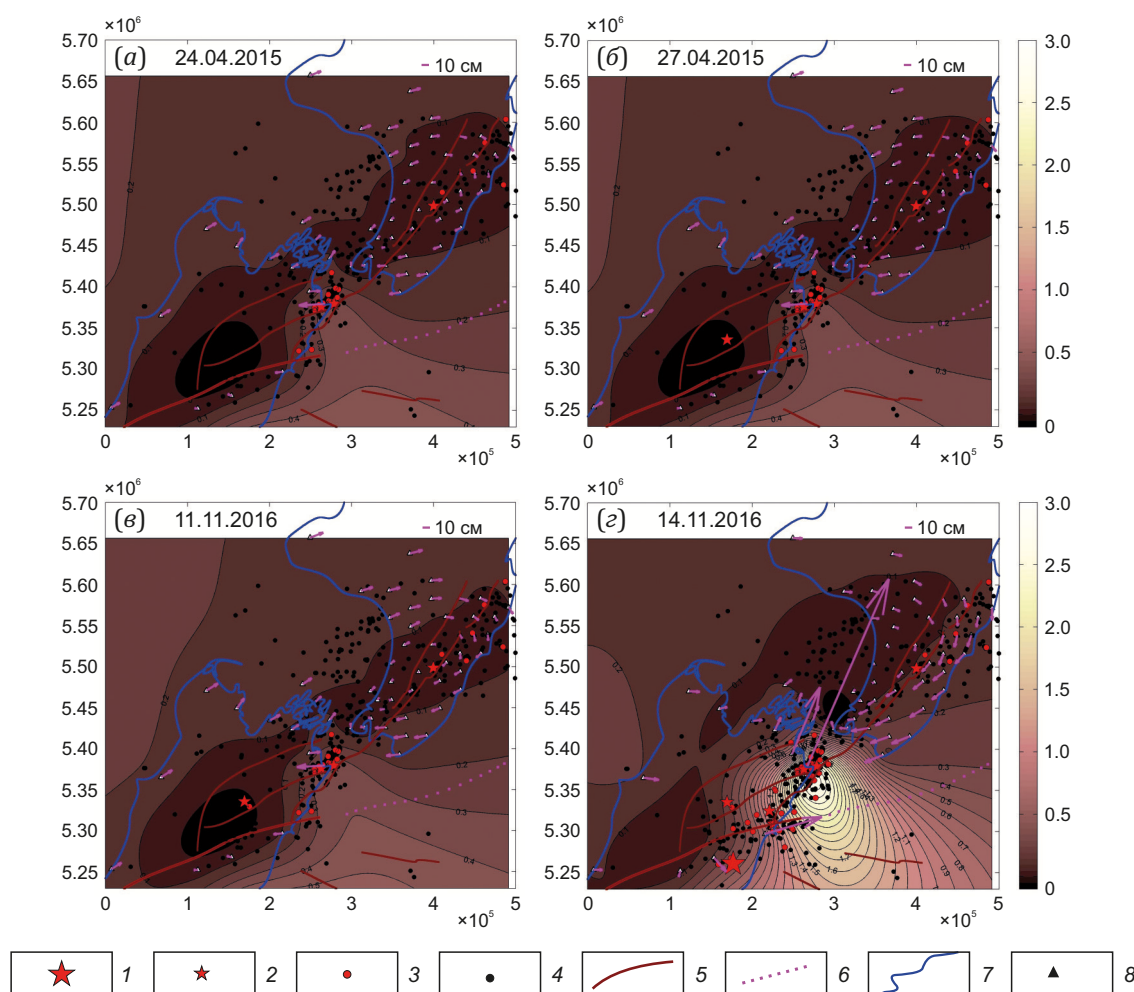


Рис. 6. Дефицит внутренних смещений в связи с землетрясением Кайкоура. Обозначения см. на рис. 3. Подписи и шкалы изолиний представлены в метрах. Стрелками показаны смещения.

Fig. 6. Inner displacement deficit due to the Kaikoura earthquake. See Fig. 3 for notations. Legend and scales to isolines are presented in meters. The arrows show the displacements.

значительном удалении от нее. Это явление требует более глубокого и комплексного изучения. Следует отметить, что в случае с землетрясением Дарфилд М7.1 произошла похожая ситуация (см. рис. 4, 6). Максимальные косейсмические смещения произошли на удалении более полусотни километров от эпицентра главного события.

Интересное явление, требующее объяснения, – вихревое движение Северного острова, которое отразилось в векторах горизонтальных смещений станций ГНСС (рис. 6).

6. СОГЛАСОВАННОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ ДИЛАТАЦИИ

Как показано в работе [Stern et al., 2020], в области тройного сочленения Кайкоура располагается центральная часть вершины гигантского суперплюма. Предполагается, что эта область подвержена центробежному растеканию подкоровых вязких масс от центра к периферии и опусканию центральной части за счет коллапса плюма. Это вызывает определенный ин-

терес к анализу вертикальных движений и деформации дилатации в этом районе. Синоптическая анимация эволюции дилатации представлена в репозитории [Dokukin et al., 2023b]. Ключевые кадры синоптической анимации приведены на рис. 7. На рис. 7, а, б, показано изменение величин дилатации в связи с землетрясением Дарфилд, развивающейся на восток в область афтершоков. Видно, что область главных сейсмических событий и их афтершоков является областью сжатия. Но в момент землетрясения Кристчёрч с М6.1 примерно в 100 км к северо-востоку от его эпицентра образуется локальный максимум растяжения, расположенный примерно в 30 км от узла тройного сочленения Кайкоура. Там не происходило сильных сейсмических событий, но в точку максимума попадает эпицентр слабого землетрясения, возникшего задолго до образования этой зоны растяжения (рис. 7, в). Этот локальный максимум дилатации относительно быстро (примерно втрое) увеличивается, сопровождаясь умеренными $5 < M < 6$ землетрясениями на удалении примерно 100 км на северо-восток – в область будущих

сильных землетрясений в районе пролива Кука и к юго-западу, в афтершоковую зону землетрясения Кристчёрч (рис. 7, г).

По мере возникновения сильных землетрясений в районе пролива Кука и оз. Герсмере максимум растяжения увеличивается и достигает эпицентральной зоны этих сейсмических событий (рис. 7, д, е). При этом сама эпицентральная область подвергается сжатию.

Очередной эпизод быстрого увеличения площади и величины максимума деформации растяжения (рис. 7, ж) сопровождается возникновением сильного и самого глубокого землетрясения М6.1 на разломе Аватере – РА (см. рис. 1) и умеренного события в акватории Тихого океана, практически в центре всей аномалии растяжения. Главное событие из общей исследуемой совокупности – землетрясение Кайкоура – способствовало

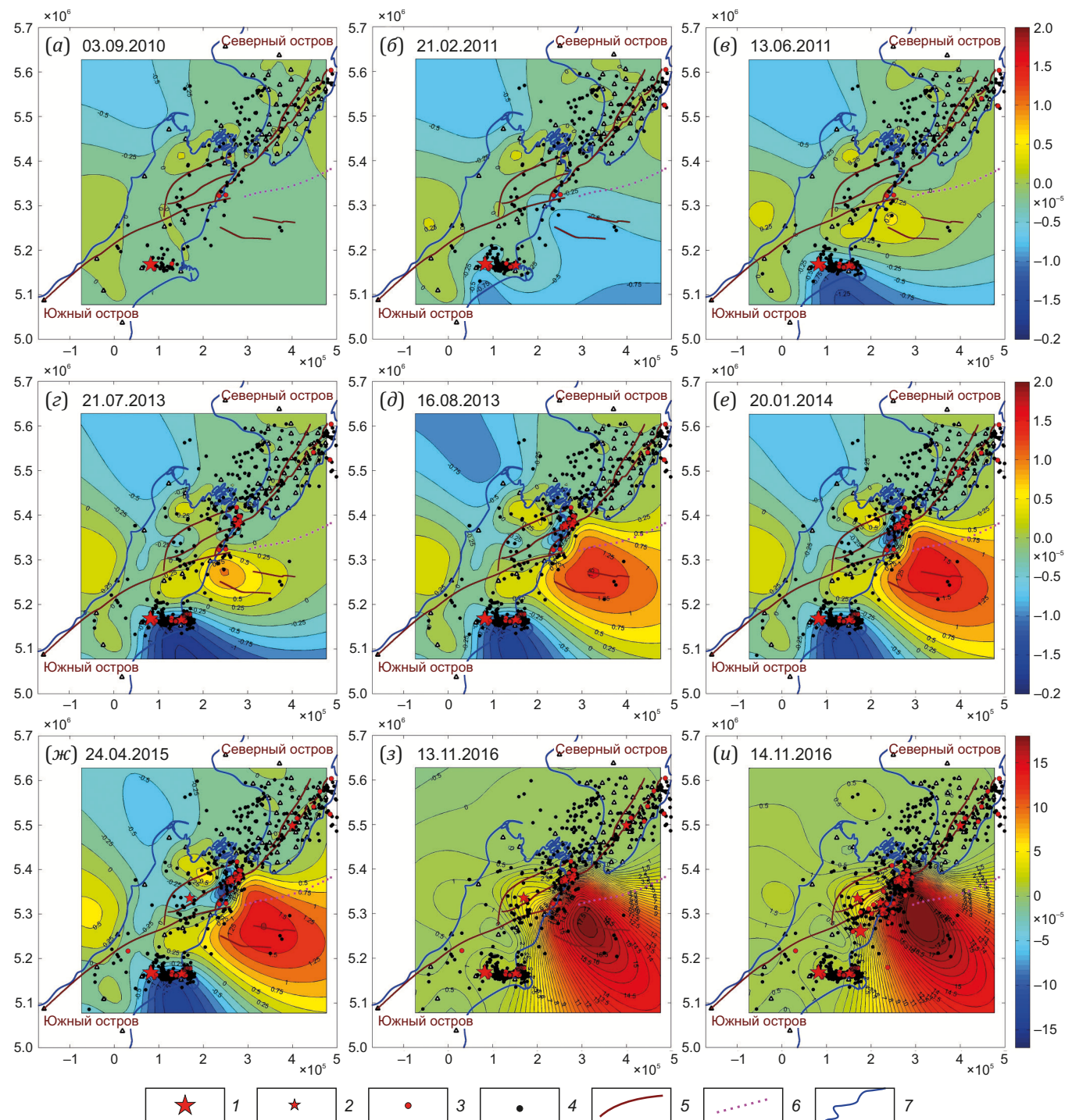


Рис. 7. Эволюция деформации дилатации в связи с землетрясениями в Новой Зеландии 2008–2021 гг. Обозначения см. на рис. 3.

Fig. 7. Evolution of dilatation deformation due to 2008–2021 New Zealand earthquakes. See Fig. 3 for notations.

интенсивному увеличению максимума растяжения вплоть до $2 \cdot 10^{-4}$ (рис. 7, з, и). Землетрясение сопровождалось серией мощных афтершоков, среди которых несколько сильных – с $M > 6$. При этом в области эпицентра землетрясения Кайкоура располагается нулевая изолиния деформации дилатации, а максимум тяготеет к проливу Кука. В этом месте, предположи-

тельно, находится «голова» суперплюма Хикуранги [Stern et al., 2020], где центробежные движения и куполообразные деформации растяжения могут считаться ординарным явлением.

Для выяснения механизма образования интенсивной деформации растяжения были исследованы накопленные горизонтальные и вертикальные смещения

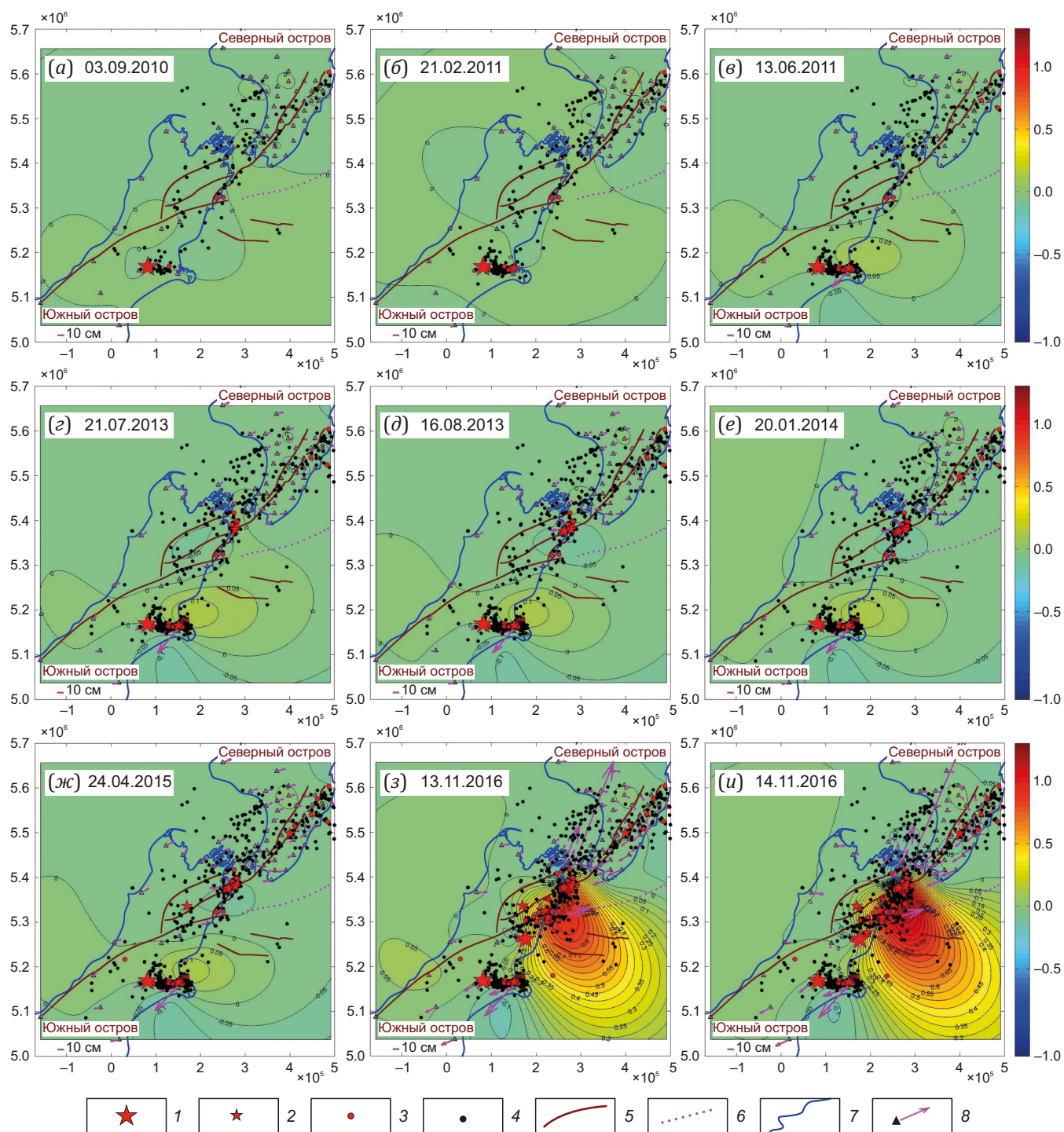


Рис. 8. Эволюция горизонтальных и вертикальных движений в связи с землетрясениями в Новой Зеландии 2008–2021 гг. Обозначения см. на рис. 3. Подписи и шкалы изолиний представлены в метрах. Стрелками показаны смещения.

Fig. 8. Evolution of horizontal and vertical motions due to 2008–2021 New Zealand earthquakes. See Fig. 3 for notations. Legends and scales to isolines are presented in meters. The arrows show the displacements.

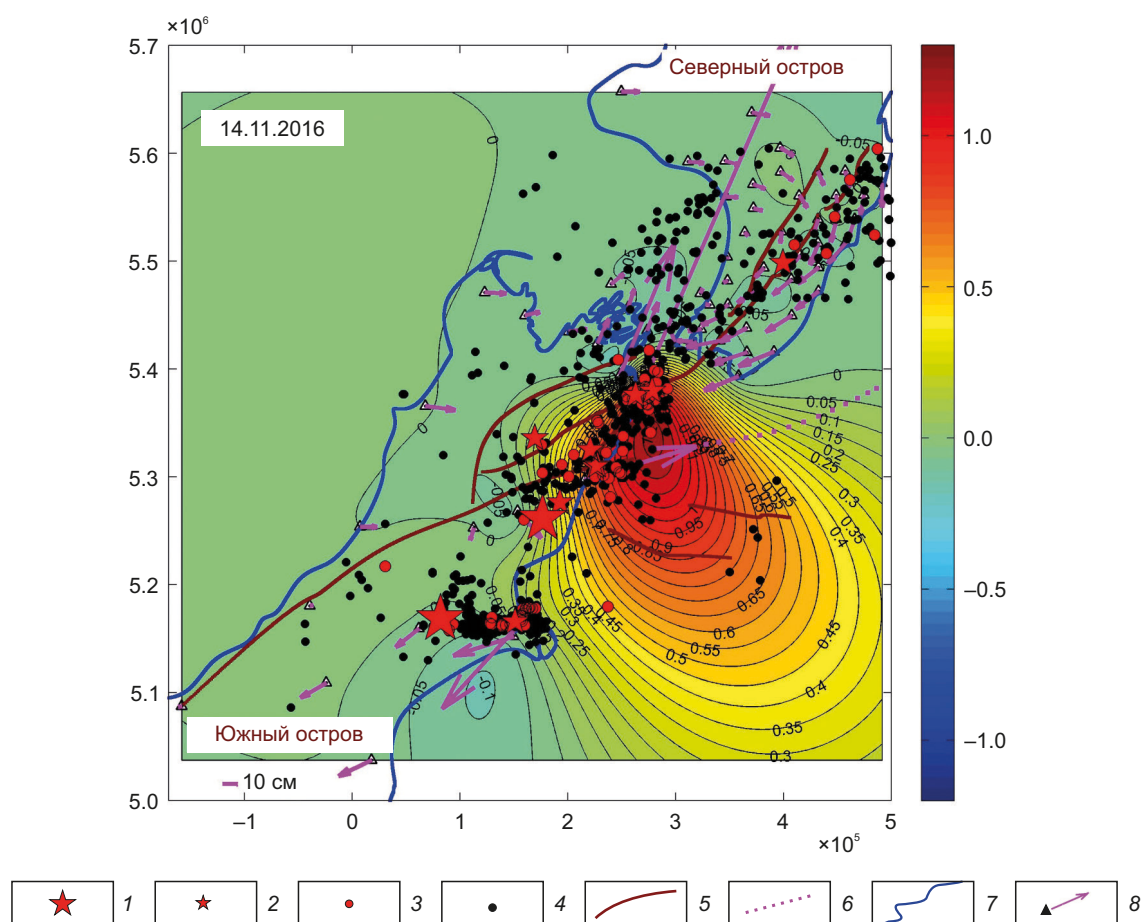


Рис. 9. Горизонтальное вращение южной части Северного острова. Условные обозначения см. рис. 3.

Fig. 9. Horizontal rotation of the southern part of the North Island. See Fig. 3 for notations.

GPS-пунктов. Характер их изменений представлен на анимации [Dokukin et al., 2023c], кадры которой показаны на рис. 8.

Значимое поднятие более 5 см образовалось вслед за землетрясением Кристчёрч (рис. 8, в). Очевидно, что оно не вполне совпадает с областью растяжений (см. рис. 7, в), но располагается в относительной близости от нее. Оно увеличивается до 10 см, но не мигрирует на северо-восток, как аномалия дилатации растяжения. Тем не менее после землетрясения Кайкоура это поднятие на 1.24 м совпадает с главной аномалией растяжения. Это обстоятельство свидетельствует в пользу предположения о наличии подкорковых сил, направленных вверх и в стороны от центра «головы» предполагаемого мантийного суперплюма, отражая его роль в сеймотектоническом процессе.

В связи с недавним обнаружением геодезических доказательств косейсмического вращения локального блока земной коры вследствие землетрясения Кайкоура [Wang et al., 2020] необходимо рассмотреть характер изменения векторов горизонтальных внутренних движений (рис. 9). Во-первых, следует отметить, что полная длина вектора косейсмических внутренних смещений составила 2.75 м. Смещение образовалось во время землетрясения Кайкоура, на удалении более 100 км от

его эпицентра в эпицентральной зоне пары предшествующих сильных землетрясений Седдон. Пункт GPS, расположенный вблизи эпицентра землетрясения Кайкоура, сместился примерно на 3 дм (рис. 9). Эти оценки говорят о сложности разрывообразования в данной сеймотектонической ситуации.

Результаты исследований показывают, что южное окончание Северного острова на протяжении всего периода наблюдений испытывало вращение по часовой стрелки со средней скоростью смещений пунктов, наиболее удаленных от центра вращения, ~1 см/год. Этот результат требует более детальных исследований, так как он может являться признаком существования сейсмоактивного литосферного вихря [Izosov et al., 2020], дальнейшие исследования которого важны для понимания механизма сеймотектонических движений и деформаций земной коры и физики землетрясений.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований современных движений и деформаций земной коры в связи с сильнейшими землетрясениями, произошедшими в Новой Зеландии, выявлены важные особенности эволюции сейсμοдеформационного процесса.

Анализ пространственно-временного распределения деформации полного сдвига дает основания предполагать, что три серии сильнейших землетрясений 2010–2016 г. могут быть взаимосвязаны единым многолетним деформационным процессом. Начало совокупности сейсмических событий обусловлено образованием аномальной деформации полного сдвига, последовательно переходящей от одной серии толчков к другой, по-видимому играющей роль триггерного механизма [Kaftan, Tatarinov, 2022].

Концентрация генерального максимума сдвиговой деформации сосредоточена непосредственно на тройном сочленении Кайкоура, в месте активности недавно открытого уникального объекта – мантийного суперплюма. Здесь же сконцентрированы максимальные поднятия, векторы горизонтальных смещений и деформация растяжения.

Пространственные перемещения областей максимальных деформаций и векторов смещений согласуются с развитием сейсмического процесса. В эпицентральных зонах сильнейших землетрясений $M > 7$ максимальные движения и деформации не регистрируются. Они приурочены к заранее разрушенным более слабыми сейсмическими событиями подвижным зонам.

Перед всеми тремя сериями сильнейших сейсмических событий в области их будущих эпицентров образовались зоны дефицита внутренних смещений земной коры, что представляет важную информацию для исследований по прогнозированию мест возникновения сильных землетрясений.

Выявленные закономерности и особенности эволюции сейсμοдеформационных процессов существенно расширяют знания о ней в районах сильных коровых землетрясений. Результаты исследований показывают перспективность ГНСС-наблюдений в решении проблемы вихревой геодинамики и плюмовой тектоники в сейсмоактивных регионах.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Beavan J., Motagh M., Fielding E.J., Donnelly N., Collett D., 2012. Fault Slip Models of the 2010–2011 Canterbury, New Zealand, Earthquakes from Geodetic Data and Observations of Post Seismic Ground Deformation, New Zealand.

Journal of Geology and Geophysics 55 (3), 207–221. <https://doi.org/10.1080/00288306.2012.697472>.

Blewett G., Hammond W.C., Kreemer C., 2018. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. *Eos*, 99. <https://doi.org/10.1029/2018E0104623>.

Dokukin P.A., Kaftan V.I., Manevich A.I., Shevchuk R.V., 2023a. Evolution of the Seismic Process and Crustal Total Shear Strain (2008–2021) under the Influence of the Hikurangi Mantle Superplume. *ESDB Repository, GCRAS, Moscow*. <https://doi.org/10.2205/ESDB-Hikurangi-shear>.

Dokukin P.A., Kaftan V.I., Manevich A.I., Shevchuk R.V., 2023b. Evolution of the Seismic Process and Horizontal Dilatation Strain (2008–2021) under the Influence of the Hikurangi Mantle Superplume. *ESDB Repository, GCRAS, Moscow*. <https://doi.org/10.2205/ESDB-Hikurangi-dilatation>.

Dokukin P.A., Kaftan V.I., Manevich A.I., Shevchuk R.V., 2023c. Evolution of the Seismic Process and Crustal Movements (2008–2021) under the Influence of the Hikurangi Mantle Superplume. *ESDB Repository, GCRAS, Moscow*. <https://doi.org/10.2205/ESDB-Hikurangi-movement>.

GNS Science, 2019. GeoNet Aotearoa New Zealand Stations Metadata Repository [Data set]. GNS Science, GeoNet. <https://doi.org/10.21420/0VY2-C144>.

Guo N., Wu Y., Zhang Q., 2022. Coseismic and Pre-Seismic Deformation Characteristics of the 2022 Ms 6.9 Menyuan Earthquake, China. *Pure and Applied Geophysics* 179, 3177–3190. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03128-3>.

Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I., Minaev V.A., Ustinov S.A., Shevchuk R.V., 2022. Geodynamic Model of the Northern Part of the Nizhnekansk Massif: Fault Tectonics, Deformations, and Insulation Properties of Rock Displacements. *Doklady Earth Sciences* 507, 909–915. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22600608>.

Hamling I.J., D'Anastasio E., Wallace L.M., Ellis S., Motagh M., Samsonov S., Palmer N., Hreinsdóttir S., 2014. Crustal Deformation and Stress Transfer during a Propagating Earthquake Sequence: The 2013 Cook Strait Sequence, Central New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119 (7), 6080–6092. <https://doi.org/10.1002/2014JB011084>.

Izotov L.A., Petrishchevsky A.M., Emel'yanova T.A., Chuprynin V.I., Lee N.S., Vasilyeva M.A., 2020. The Model of Formation of the Western Pacific Marginal Seas: Vortex Geodynamics, Seismicity, and Mantle Upwelling. *Journal of Volcanology and Seismology* 14, 44–57. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010029>.

Jiang Z., Huang D., Yuan L., Hassan A., Zhang L., Yang Zh., 2018. Coseismic and Postseismic Deformation Associated with the 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand: Fault Movement Investigation and Seismic Hazard Analysis. *Earth Planets Space* 70, 62. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0827-3>.

Kaftan V.I., Tatarinov V.N., 2022. Registration of Slow Deformation Waves According to GNSS Observations. *Doklady Earth Sciences* 505, 489–495. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22070091>.

Kaiser A., Holden C., Beavan J., Beetham D., Benites R., Celentano A., Collett D., Cousins J., Cubrinovski M., Dellow G.,

Denys P. et al., 2012. The Mw 6.2 Christchurch Earthquake of February 2011: Preliminary Report. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 55 (1), 67–90. <https://doi.org/10.1080/00288306.2011.641182>.

Langridge R.M., Ries W.F., Litchfield N.J., Villamor P., Van Dissen R.J., Barrell D.J.A., Rattenbury M.S., Heron D.W., Haubrock S., Townsend D.B., Lee J.M. et al., 2016. The New Zealand Active Faults Database. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 59 (1), 86–96. <https://doi.org/10.1080/00288306.2015.1112818>.

Rebetsky Yu.L., 2018. Regularities of Crustal Faulting and Tectonophysical Indicators of Fault Metastability. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 629–652. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0365>.

Ristau J., 2010. The Canterbury, New Zealand Earthquake Sequence I: The Mw 7.1 Darfield Earthquake of 3 September 2010 and Aftershock Sequence. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre* 47 (7–12), 48–65. <https://doi.org/10.5281/zenodo.998755>.

Shi X., Tapponnier P., Wang T., Wei S., Wang Y., Wang X., Jiao L., 2019. Triple Junction Kinematics Accounts for the 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake Rupture Complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (52), 26367–2637. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916770116>.

Stern T., Lamb S., Moore J.D.P., Okaya D., Hochmuth K., 2020. High Mantle Seismic P-Wave Speeds as a Signature for

Gravitational Spreading of Superplumes. *Science Advances* 6, 22. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba7118>.

Toraldo Serra E.M., Delouis B., Emolo A., Zollo A., 2013. Combining Strong-Motion, InSAR and GPS Data to Refine the Fault Geometry and Source Kinematics of the 2011, Mw 6.2, Christchurch Earthquake (New Zealand). *Geophysical Journal International* 194 (3), 1760–1777. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt186>.

Ulrich T., Gabriel A.-A., Ampuero J.-P., Xu W., 2019. Dynamic Viability of the 2016 Mw 7.8 Kaikōura Earthquake Cascade on Weak Crustal Faults. *Nature Communications* 10, 1213. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09125-w>.

Wang T., Jiao L., Tapponnier P., Shi X., Wei S., 2020. Space Imaging Geodesy Reveals near Circular, Coseismic Block Rotation during the 2016 Mw 7.8 Kaikōura Earthquake. *New Zealand. Geophysical Research Letters* 47 (22), e2020GL090206. <https://doi.org/10.1029/2020GL090206>.

Wang T., Wei Sh., Shi X., Qiu Q., Li L., Peng D., Weldon R.J., Barbot S., 2018. The 2016 Kaikoura Earthquake: Simultaneous Rupture of the Subduction Interface and Overlying Faults. *Earth and Planetary Science Letters* 482, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.056>.

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>.