



**EVOLUTION OF INNER CRUSTAL DISPLACEMENT DEFICIT ACCORDING TO THE GPS DATA
IN CONNECTION WITH SEISMICITY IN THE PERIOD OF 2014–2024
AND THE $M_w=7.4$ HUALIEN EARTHQUAKE, TAIWAN**

V.I. Kaftan ¹✉, **A.Yu. Melnikov** ², **P.A. Dokukin** ²

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

² RUDN University, 6 Miklukho-Maklay St, Moscow 117198, Russia

ABSTRACT. The study deals with the analysis of the evolution of seismicity and inner crustal movements in Taiwan over the past 10 years. The primary data sources included time series generated from permanent GPS observations, the earthquake catalog, and the location of the main tectonic structures. Horizontal displacement vectors of GPS stations were determined for each day, relative to the initial epoch. An inner reference system was used in the absence of general area motion defined in the global coordinate system. An animation video was made for synoptic analysis of the evolution of internally generated seismic and tectonic motions. It is shown that the majority of strong $M \geq 6$ earthquakes occurred within the boundaries of the inner crustal movement deficit zones or thereon. This allows us to consider such high-strength crustal areas as prognostic signs of earthquakes. They are revealed by GPS observations over several years and destroyed by strong seismic events, as well as by large groups of moderate and weak earthquakes. By 2024, on the island there was formed an east-to-west elongated high-strength zone. It connects the place of convergence of the Ryukyu and Manila trenches with the insular land. It can be assumed that this area marks a zone of high seismic-generating stresses, which is important to take into account in further assessment of seismic hazard.

KEYWORDS: Taiwan Island; earthquake; GPS; inner crustal movements; seismic hazard

FUNDING: The study was conducted as part of the state assignment of GC RAS approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.



EDN: DKQFQO

RESEARCH ARTICLE

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

Received: June 16, 2024

Revised: November 5, 2024

Accepted: November 12, 2024

FOR CITATION: Kaftan V.I., Melnikov A.Yu., Dokukin P.A., 2025. Evolution of Inner Crustal Displacement Deficit According to the GPS Data in Connection with Seismicity in the Period of 2014–2024 and the $M_w=7.4$ Hualien Earthquake, Taiwan. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (1), 0812. doi:10.5800/GT-2025-16-1-0812

English version: see article page online

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФИЦИТА ВНУТРЕННИХ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ GPS В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ 2014–2024 гг. И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ХУАЛЯНЬ, ТАЙВАНЬ ($M_w=7.4$)

В.И. Кафтан¹, А.Ю. Мельников², П.А. Докукин²

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

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

АННОТАЦИЯ. Исследование посвящено анализу эволюции внутренних движений земной коры территории Тайваня в связи с ходом сейсмического процесса за последние 10 лет. Первичными данными послужили временные ряды непрерывных GPS-наблюдений, каталог землетрясений и расположение основных тектонических структур. На каждые сутки по отношению к начальной эпохе определялись векторы горизонтальных смещений станций GPS. Использовалась внутренняя система отсчета, согласно которой общее движение территории, определенное в глобальной системе координат, исключалось. Была построена видеопанорама для синоптического анализа эволюции внутренних движений в связи с сейсмичностью и тектоникой. Показано, что большинство сильных, $M \geq 6$, землетрясений произошло внутри и на границах зон дефицита внутренних движений земной коры. Это позволяет рассматривать эти области упрочнения земной коры в качестве сейсмопрогностического признака. Они обнаруживаются по мере накопления GPS-наблюдений за несколько лет и разрушаются сильными сейсмическими событиями, а также большими группами умеренных и слабых землетрясений. На момент 2024 г. на территории острова образовалась зона упрочнения земной коры, вытянутая полосой от восточного побережья к западному. Она связывает места сближения глубоководных желобов Рюкю и Манила с сушей островной территории. Можно полагать, что эта область маркирует зону повышенных сейсмогенерирующих напряжений, что важно принимать во внимание при дальнейшей оценке сейсмической опасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: о. Тайвань; землетрясение; GPS; внутренние движения земной коры; сейсмическая опасность

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Остров Тайвань расположен в сложных тектонических условиях взаимодействия Евразийской и Филиппинской глобальных тектонических плит. Он маркирует зону столкновения клинообразного выступа Филиппинской плиты, северным бортом погружаясь под Евразийскую плиту, а западным одновременно на нее напозая. Этот механизм служит причиной горообразования и собственно роста самого острова [Malavieille et al., 2019; Sun et al., 2015]. Скорость сближения Филиппинской и Евразийской плит в этом районе значительно высока и характеризуется величиной $\sim 7\text{--}9$ см/год [Yu et al., 1997; Sella et al., 2002].

Наиболее высокая сейсмическая активность региона характерна для области субдукции Филиппинской плиты, образованной глубоководным желобом Рюкю и следующими за ним подводными тектоническими формами рельефа. Здесь в 1920 г. произошло подводное мегаземлетрясение $M 8.0$. На суше наиболее высокая сейсмическая активность имеет место в зоне разломов Продольной Долины, пролегающей параллельно восточному берегу острова. Именно в месте сочленения глубоководного желоба Рюкю и северного окончания Продольной Долины вблизи г. Хуалянь в апреле 2024 г. произошло одно из наиболее разрушительных землетрясений ($M_w=7.4$) за последние десятилетия. Это событие принесло более тысячи человеческих жертв. Анализ последствий землетрясения Хуалянь 2024 г. в

аспекте разрушения строительных и инженерных конструкций, социально-экономических последствий и стратегий устойчивого развития представлен в работе [Kanwal, 2024]. Масштабы оползневых процессов в связи с этим сильнейшим событием рассмотрены в работе [Chang et al., 2024]. Косейсмические движения и деформации земной коры в результате землетрясения Хуалянь 2024 г. рассмотрены в статье [Tang et al., 2024].

Сегодня считается, что отсутствие взаимных движений бортов сейсмогенерирующего тектонического разлома свидетельствует о накоплении упругих напряжений, сброс которых приводит к землетрясению. Сети GPS не всегда достаточно детально и тщательно контролируют непосредственно активные разломы в силу недостаточной плотности наблюдательных станций. Но они позволяют выявить некоторую наименее подвижную область заблаговременно до сейсмического события, как правило, в месте его будущего эпицентра. Эти области мы именуем дефицитом внутренних смещений земной коры [Gvishiani et al., 2020].

Это недостаточность (малая величина) модуля вектора смещений земной поверхности, определенная во внутренней системе отсчета [Kaftan, Tatarinov, 2021]. Обычно ее критическая (минимальная) величина близка к точности определения (разности координат) смещений ~ 1 см. Внутренняя система отсчета смещений – система отсчета, в которой исключены внешние движения. Векторы внутренних смещений определяются

по отношению к центру их статистического распределения. Таким образом выявляются взаимные движения, способствующие возникновению сейсмогенерирующих напряжений и разрушений.

Такие области неоднократно выявлялись ретроспективно в связи с сильными землетрясениями в разных регионах мира. Так, например, в случае землетрясения Риджкрест, Калифорния, США (2019, М7.1) [Kaftan, 2021a], такая малоподвижная зона покрывала вытянутую область вдоль границы контакта Тихоокеанской и Северо-Американской плит. Перед землетрясениями Кумамото (Япония, 2016 г., М7.3) [Kaftan et al., 2022] и Ван (Турция, 2011 г., М7.2) [Kaftan et al., 2021] обнаружены квазикруговые области минимальных горизонтальных смещений. Несколько сильных землетрясений Новой Зеландии 2010–2016 гг. произошли в зонах концентрации минимальных смещений и вблизи них [Kaftan et al., 2024a]. Перед разрушительными землетрясениями Караманмараш, Турция (2023, М7.5–7.8), область дефицита смещений покрыла эпицентральной зоны сильнейших толчков и их афтершоков [Dokuin et al., 2023a].

Все это, наряду с упомянутым катастрофическим сейсмическим событием 2024 г., послужило поводом для изучения эволюции дефицита внутренних движений земной коры на территории о-ва Тайвань как продолжения общего цикла исследований взаимосвязи дефицита внутренних движений и сильных землетрясений.

Задачами настоящего исследования являлись: сбор и предварительная подготовка измерительных данных GPS-станций, вычисление и графическое представление распределения накопленных внутренних смещений земной коры о-ва Тайвань, создание кинематических визуализаций сейсмодеоформационного процесса, изучение пространственно-временной согласованности движений земной коры и сейсмичности.

Основной целью работы явилась оценка возможности прогнозирования мест будущих сильных сейсмических событий по результатам многолетних GPS-наблюдений.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

В анализе использованы временные ряды координат непрерывных GPS-станций, полученные с веб-ресурса

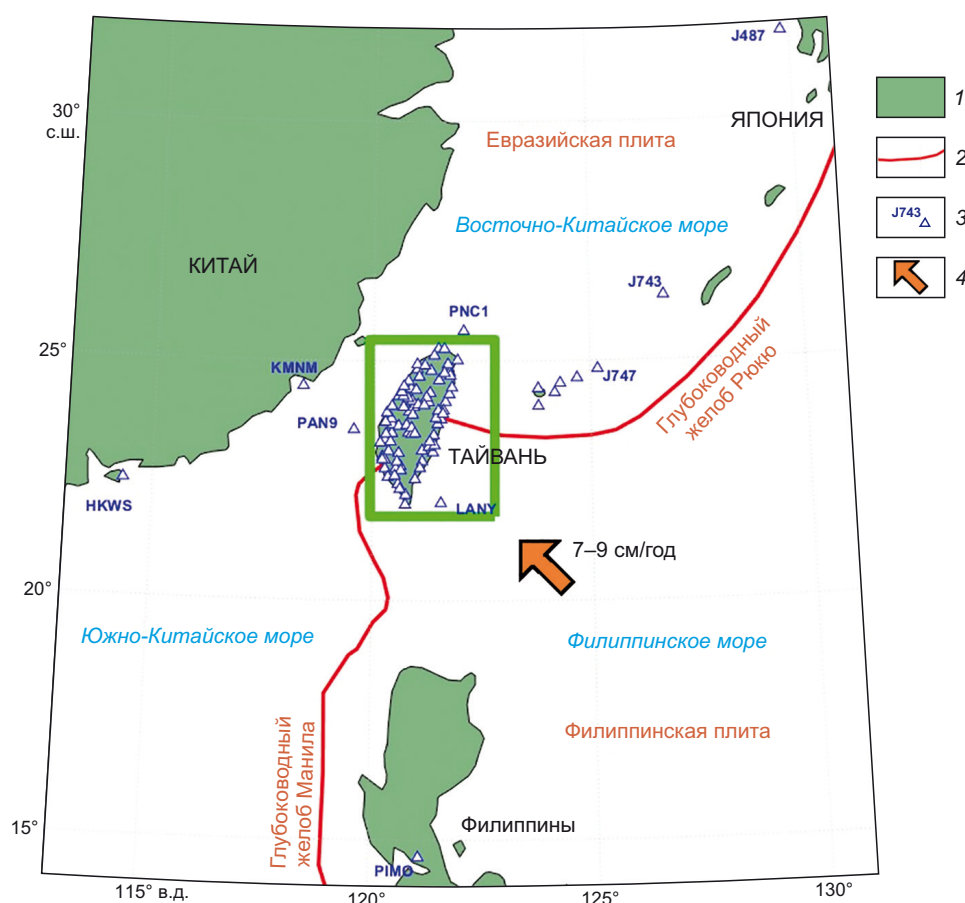


Рис. 1. Территориальное расположение исследуемого региона, сеть GPS и главные тектонические элементы (по [Galgana et al., 2007; Lemenkova, 2021]). 1 – территория суши; 2 – глубоководные желоба; 3 – станции GPS; 4 – направление движения Филиппинской плиты. Зеленым прямоугольником выделена основная сеть GPS, представленная на рис. 2.

Fig. 1. Territorial location of the study region, GPS network and main tectonic elements (after [Galgana et al., 2007; Lemenkova, 2021]). 1 – onland area; 2 – deep-sea trenches; 3 – GPS stations; 4 – direction of movement of the Philippine plate. The green rectangle highlights the main GPS network, shown in Fig. 2.

Геодезической лаборатории Невады (<http://geodesy.unr.edu/index.php>). При этом использованы результаты финальной математической обработки, обеспечивающие субсантиметровую точность определения координат из суточных наблюдений. При этом использовано профессиональное программное обеспечение GIPSY OASIS II (Jet Propulsion Laboratory (JPL)). Стратегия обработки данных представляет собой обработку методом «precise point positioning» (PPP) с использованием точной продукции JPL об эфемеридах спутников, поправках часов и других характеристик [Blewitt et al., 2018].

Для целей деформационного анализа была сформирована сеть GPS-станций, представленная на рис. 1

и 2. Общее число отобранных станций составило 96. На рис. 1, 2 также показаны основные тектонические структуры и эпицентры сильнейших землетрясений, произошедших с 2014 по 2024 г.

В анализе были использованы данные о тектонических разломах, полученные с веб-ресурса (<https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/>) и из публикаций [Galgana et al., 2007; Lemenkova, 2021; Malavieille et al., 2019].

Каталог землетрясений $M > 2.5$ был получен с веб-ресурса NEIC (National Earthquake Information Center, USA; <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>).

Сильнейшие сейсмические события за исследуемый период представлены в табл. 1.

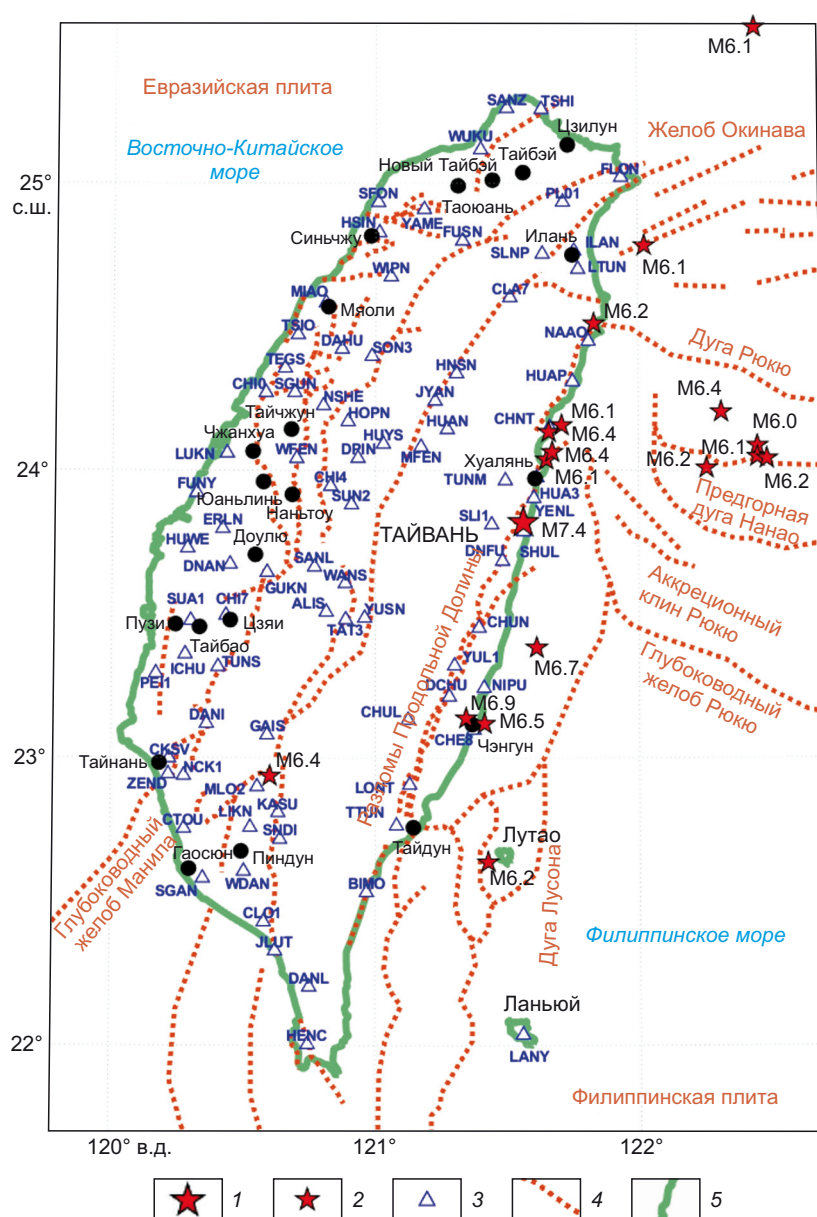


Рис. 2. Сеть GPS-станций островной территории, основные тектонические дислокации (по [Malavieille et al., 2019]), сильнейшие землетрясения с магнитудой: 1 – $M \geq 7$; 2 – $7 > M \geq 6$; 3 – станции GPS; 4 – тектонические дислокации; 5 – береговая линия.

Fig. 2. GPS network on the insular territory, main tectonic dislocations (after [Malavieille et al., 2019]), strong earthquakes with magnitudes: 1 – $M \geq 7$; 2 – $7 > M \geq 6$; 3 – GPS stations; 4 – tectonic dislocations; 5 – coastline.

Таблица 1. Сильнейшие ($M > 6$) землетрясения Тайваня 2014–2024 гг.
Table 1. Strongest earthquakes ($M > 6$) of the study area from 2014 to 2024

№ п/п	Дата, время	Город/место	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина, м	Магнитуда
1	2014-12-10 21:03:39.260	77 км к вост от Чиуфень	25.5403	122.4503	256	6.1
2	2015-02-13 20:06:32.330	Филиппинское море	22.6374	121.427	30	6.2
3	2015-04-20 01:42:58.380	Илань	24.2026	122.3158	29	6.4
4	2015-04-20 12:00:00.070	Филиппинское море	24.0851	122.453	29	6.0
5	2015-04-20 11:45:13.440	Филиппинское море	24.0471	122.4532	29	6.1
6	2016-02-05 19:57:27.380	Тайнань, Гаосюн	22.9375	120.6014	23	6.4
7	2016-05-31 05:23:47.310	Филиппинское море	25.5615	122.5458	246.4	6.4
8	2018-02-04 13:56:41.950	Хуалянь	24.1572	121.7078	12	6.1
9	2018-02-06 15:50:43.320	Хуалянь	24.1338	121.6586	17	6.4
10	2019-04-18 05:01:06.493	Хуалянь	24.0374	121.6501	20	6.1
11	2020-12-10 13:19:58.682	Филиппинское море	24.7818	122.0243	71	6.1
12	2021-10-24 05:11:34.230	Илань	24.5108	121.8314	69	6.2
13	2022-01-03 09:46:35.767	Хуалянь/Филиппинское море	24.0079	122.2592	19	6.2
14	2022-03-22 17:41:38.584	Тайдун	23.3839	121.6118	24	6.7
15	2022-05-09 06:23:02.067	Филиппинское море	24.0406	122.4888	21	6.2
16	2022-09-17 13:41:17.890	Тайдун	23.1191	121.4138	10	6.5
17	2022-09-18 06:44:13.846	Тайдун	23.138	121.3439	10	6.9
18	2024-04-02 23:58:11.228	Хуалянь	23.819	121.5616	34.75	7.4
19	2024-04-03 00:11:25.327	Хуалянь	24.0639	121.6717	12.564	6.4

Согласно статистике, с 1992 по 2013 г. на Земле произошло 3927 землетрясений с $M \geq 6$. Это в среднем составило 178.5 землетрясений в год [Poygina et al., 2020]. Примерно за десятилетие в регионе Тайваня произошло 19 сильных (по качественной шкале Рихтера) землетрясений $M \geq 6.0$ и 173 умеренных сейсмических события, среди которых случались и разрушительные. Это свидетельствует о высоком уровне сейсмической активности региона. Сходная ситуация имела место в Новой Зеландии с 2010 по 2016 г., когда на ее территории произошло 11 сильных землетрясений с $M \geq 6$ [Kaftan et al., 2024a].

Для выявления мест минимальных движений нами вычислялись горизонтальные смещения U_n и U_e GPS-станций как разность плановых координат n и e в картографической проекции UTM (Universal Transvers Mercator) для каждой даты наблюдений по отношению к начальной эпохе T_0 :

$$U_n = n_i - n_0, U_e = e_i - e_0, \quad (1)$$

где индекс i обозначает текущую эпоху измерений. Таким образом мы получаем смещения станций в стандартной глобальной координатной системе отсчета ITRF14. Эти смещения демонстрируют главным образом движения глобальных тектонических плит. При этом затрудняется оценка движений, связанных с локальными источниками деформации. Для ослабления этого эффекта полезно представлять смещения в локальной (внутренней) координатной системе отсчета.

Сейсмический разрыв и накопление упругой энергии в очаге землетрясения обусловлены локальными процессами, поэтому целесообразно абстрагироваться от однонаправленных глобальных движений исследуемой территории.

Результаты геодезических исследований с целью получения внутренних координатных систем отсчета, свободных от влияния внешних причин, отражены в работах [Grafarend, Schaffrin, 1974; Welsch, 1979].

Совокупность пунктов локальной контрольной сети GPS-станций представляется механической системой. Согласно теореме классической механики о движении центра масс (инерции), ускорение центра инерции не зависит от внутренних силовых взаимодействий. Ускорение a совокупности n материальных точек механической системы выражено формулой:

$$\sum_i m_i \vec{a}_i = \sum_i \vec{F}_i + \sum_i \sum_k \vec{f}_{i,k}, \quad (2)$$

где m_i – масса материальной точки, $\vec{F}_i$ – вектор внешней силы, $\vec{f}_{i,k}$ – вектор силы внутреннего взаимодействия пары точек, i, k – текущие индексы точек.

При этом векторы внешних сил приложены к центру инерции механической системы. Общее движение механической системы в координатной системе отсчета обусловлено суммой внешних сил и не зависит от сил внутреннего взаимодействия элементов механической системы. Согласно третьему закону Ньютона, сумма внутренних сил взаимодействия (второе слагаемое

формулы (2)) равна нулю. Следовательно, сумма взаимных скоростей движений всех пар материальных точек системы также равна нулю. Этому условию отвечает среднее всех векторов скоростей движений в глобальной координатной системе отсчета, за вычетом из них вектора общего движения механической системы.

В нашем случае внутренние смещения (движения) легко получить, вычитая из каждого смещения U_j определенного в глобальной системе отсчета, среднее значение $\bar{U}$. Таким образом, мы получаем систему отсчета внутренних смещений (или скоростей смещений) согласно принципу no net rotation/translation.

$$u_{n_j} = U_{n_j} - \bar{U}_n, \quad u_{e_j} = U_{e_j} - \bar{U}_e, \quad (3)$$

где индекс j является порядковым номером пункта GPS-наблюдений.

Данный подход позволяет обнаружить в пределах исследуемой территории более или менее подвижные участки земной коры, что ассоциируется нами с местами пониженной и повышенной прочности. Это осуществляется анализом распределения модуля вектора внутренних смещений (3):

$$\delta s = \sqrt{u_{n_j}^2 + u_{e_j}^2}. \quad (4)$$

Эти характеристики вычислялись по накопленным смещениям каждой станции на каждый момент их регистрации. В случае временных технических перерывов работы GPS-станции на эти интервалы значения смещений получали с использованием интерполяции сплайном Эрмита. По этим значениям строились цифровые, а впоследствии графические модели их пространственного распределения.

Попытаемся дать количественную оценку предложенной характеристике. Напомним, что она является аналогом уже хорошо известного в сейсмоtectонике понятия дефицита скольжения (slip deficit) и/или медленного скольжения разлома (slow fault slip). Наша характеристика может отвечать за поведение конкретного разлома только в случае его достаточной обеспеченности наблюдательной GPS-сетью. В большинстве случаев стандартные сети непрерывных GPS-станций государственного масштаба имеют взаимные удаления в среднем 8–10 км и более, поэтому наша характеристика строго не контролирует поведение конкретного разлома, но показывает малый (недостаточный по отношению к среднему) уровень движения в обширной области охвата наблюдательной сетью.

Для нашей оценки оттолкнемся от точности определения координат средствами непрерывных GPS-наблюдений. Фирмы-производители GPS-аппаратуры геодезического класса декларируют стандартную ошибку измерения $\sigma = 3 + Da$, где a – коэффициент понижения точности по мере увеличения расстояния D . Для взаимных удалений порядка 8–10 км правдоподобной оценкой будет $\sigma = m_{n,e} \approx 5$ мм. Заметим, что точность спутниковых измерений не может быть строго фиксированной из-за влияния множества внешних факторов.

Согласно теории ошибок Гаусса, стандартная ошибка разности измерений по каждой координате составит 7 мм.

Для окончательной характеристики (4) используем формулу стандартной ошибки функции от двух измерений:

$$m_{\delta s}^2 = \left(\frac{\partial S}{\partial u_n} m_{u_n} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial u_e} m_{u_e} \right)^2. \quad (5)$$

Частные производные функции (4) по каждому из аргументов

$$\frac{\partial S}{\partial u_n} = \frac{u_n}{\delta s}, \quad \frac{\partial S}{\partial u_e} = \frac{u_e}{\delta s}$$

представляют собой $\cos A$ и $\sin A$, где A – азимут вектора горизонтального смещения соответственно.

При равнозначности определения смещений по каждой координате окончательная формула стандартной ошибки принимает вид $m_{\delta s}^2 = 2(\cos^2 A + \sin^2 A)m_u^2 = 2m_u^2$. Отсюда получаем $m_{\delta s} = 10$ мм.

Чтобы гарантировать попадание случайной ошибки в заданный интервал с вероятностью 99.73 %, применяем правило трех сигм, тогда для минимального модуля вектора (дефицита) смещений получаем интервал $\delta s < 30$ мм.

Эта оценка сделана для однократной разности координат и имеет условный характер. Принимая во внимание высокие скорости движений, дефицитом накопленных смещений можно считать большие величины, но, как показывает опыт, близкого порядка.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По описанной методике получали кадры полей дефицита смещений, объединяемые в синоптическую анимацию. При этом учитывалась цифровая информация о пространственном положении тектонических разломов и эпицентров землетрясений $M > 2.5$.

Изучая эволюцию пространственно-временных изменений движений и деформаций земной коры с помощью кинематических анимационных моделей, мы обнаруживаем значительное сходство поведения метеорологических и гидрологических процессов и процессов в земной коре, наблюдаемых в ускоренном визуальном представлении. На земной поверхности как отражение глубинных перемещений протекают волновые и вихревые процессы, столкновения и разнонаправленные движения деформационных фронтов, подобные изменениям в атмосфере и гидросфере. В связи с этим на начальных этапах исследования мы прибегаем именно к синоптическому анализу, расширяя его на изучение поведения твердой, но весьма подвижной геосферы [Kaftan, 2021b; Dokukin et al., 2023a, 2023b].

Таким образом была создана видеоанимация [Kaftan et al., 2024b], позволяющая осуществить синоптический анализ поведения дефицита внутренних движений и сейсмической активности в связи с расположением тектонических элементов региона. Наблюдая визуально за ходом накопления модулей векторов

смещений, можно видеть участки повышенной и пониженной прочности земной коры.

Ключевые кадры видеoaнимации представлены на рис. 3, 4, 5, 6, 7. На них показано состояние областей дефицита внутренних движений до и сразу после силь-

нейших сейсмических толчков. Следует иметь в виду, что область дефицита смещения формируется за несколько лет, в зависимости от скорости накопления внутренних движений. Она определяется на территории, обеспеченной GPS-станциями, поэтому мы не можем

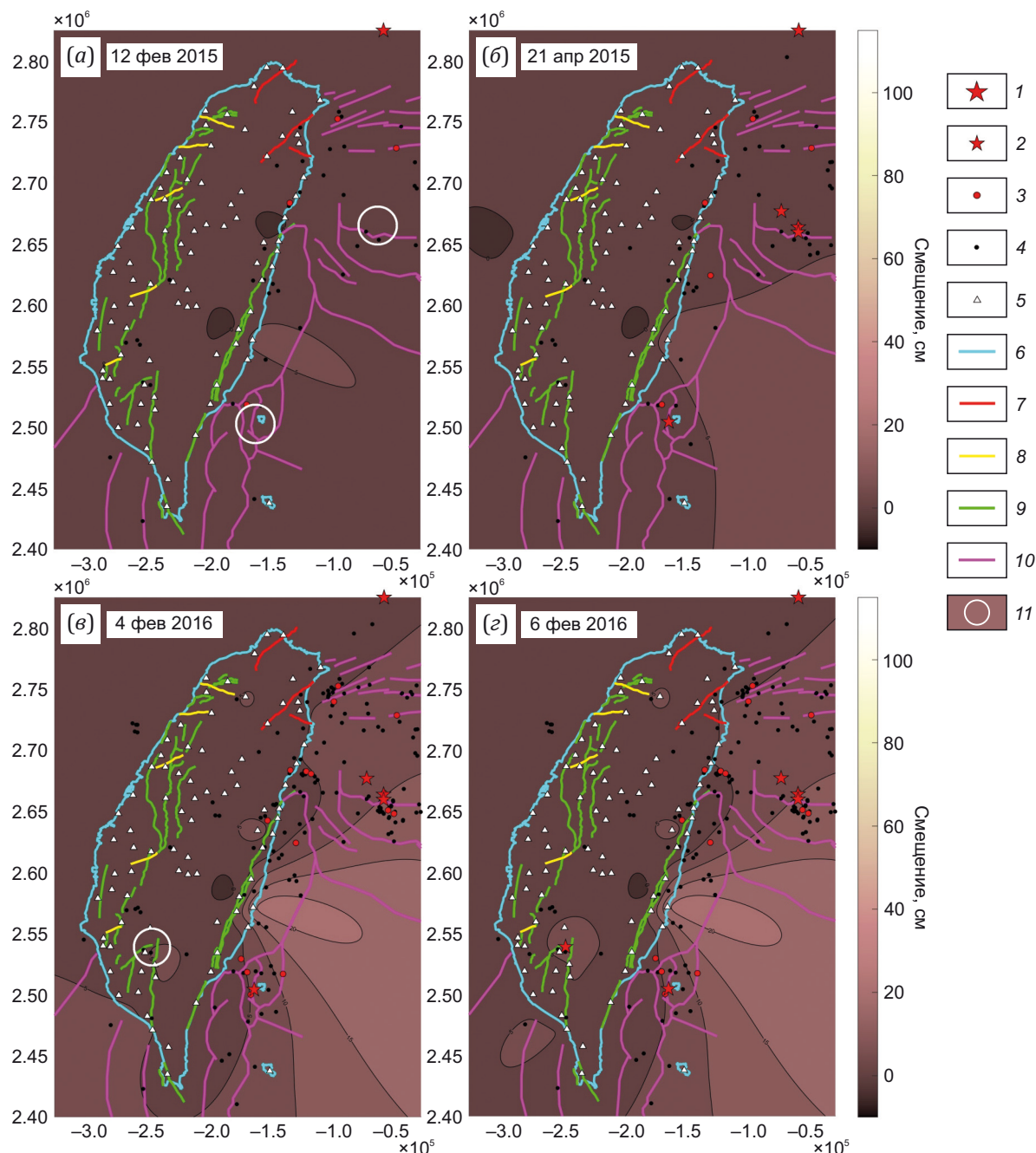


Рис. 3. Формирование и разрушение области дефицита смещения в связи с землетрясениями февраля – апреля 2015 г. (M6.2) (а, б) и 5 февраля 2016 г. (M6.0–6.4) (г, з).

1–4 – эпицентры землетрясений: 1 – $M \geq 7$, 2 – $7 > M \geq 6$, 3 – $6 > M \geq 5$, 4 – $5 > M \geq 2.5$; 5 – пункты GPS; 6 – береговая линия; 7–10 – линии разломных зон (по [Styron, Pagani, 2020]): 7 – сброс, 8 – сдвиг по простиранию, 9 – взброс, взбросо-сдвиг, 10 – морские тектонические дислокации; 11 – места будущих эпицентров.

Fig. 3. Formation and destruction of the displacement deficit area due to the earthquakes of February – April 2015 (M6.2) (а, б) and February 5, 2016 (M6.0–6.4) (г, з).

1–4 – earthquake epicenters: 1 – $M \geq 7$, 2 – $7 > M \geq 6$, 3 – $6 > M \geq 5$, 4 – $5 > M \geq 2.5$; 5 – GPS points; 6 – coastline; 7–10 – lines of the fault zones (after [Styron, Pagani, 2020]): 7 – normal fault, 8 – strike-slip fault, 9 – reverse fault, reverse-slip, 10 – oceanic faults; 11 – future epicenter locations.

использовать эту характеристику для анализа землетрясений в акватории моря. В этой связи [рис. 3](#) не является показательным.

На [рис. 3](#) мы можем видеть, что коричневая область целиком покрывает территорию острова. Но появляется ослабленная зона в районе будущего сильного землетрясения 22 марта 2022 г. (см. [рис. 6, г](#)), которая непрерывно разрушается по мере умеренной и слабой сейсмичности внутри нее.

К 2018 г. область дефицита внутренних смещений/движений сконцентрировалась в центральной части острова с двумя ответвлениями в направлениях городов Хуалянь и Ченгун (см. [рис. 4](#)). Северное ответвление совпало с эпицентрами пары (дуплета) будущих землетрясений Хуалянь 4 и 6 февраля 2018 г. (M6.1 и M6.4). Второе из этой пары событий разрушило область дефицита смещений, образовав зону разуплотнения земной коры в районе Хуалянь (см. [рис. 4, г](#)).

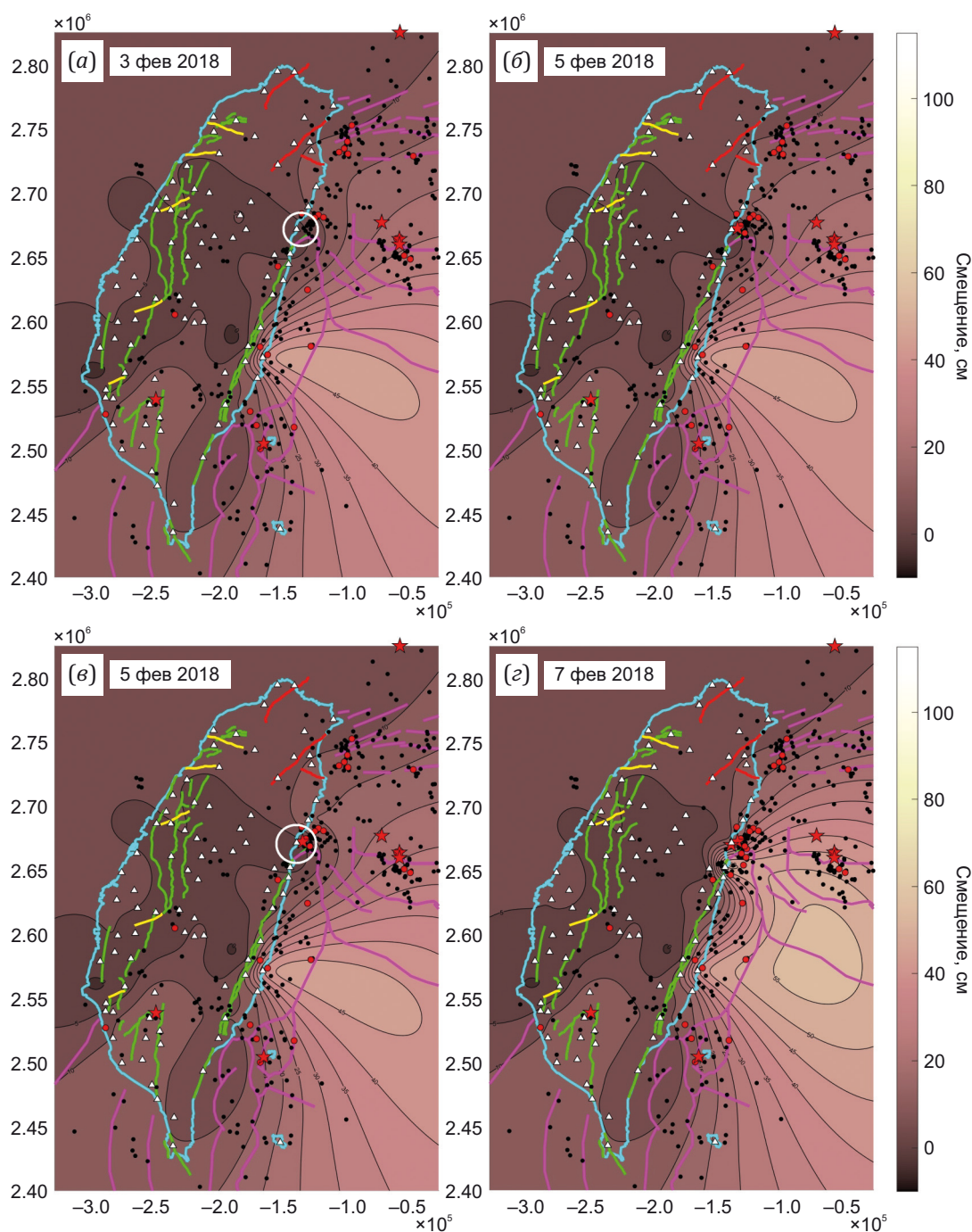


Рис. 4. Формирование и разрушение области дефицита смещения в связи с землетрясениями 4 февраля 2018 г. (M6.1) (*а, б*) и 6 февраля 2018 г. (M6.4) (*г, з*). Общую легенду см. на [рис. 3](#).

Fig. 4 Formation and destruction of the displacement deficit region in connection with the earthquakes of February 4, 2018 (M6.1) (*a, б*) and February 6, 2018 (M6.4) (*г, з*). See [Fig. 3](#) for a common legend.

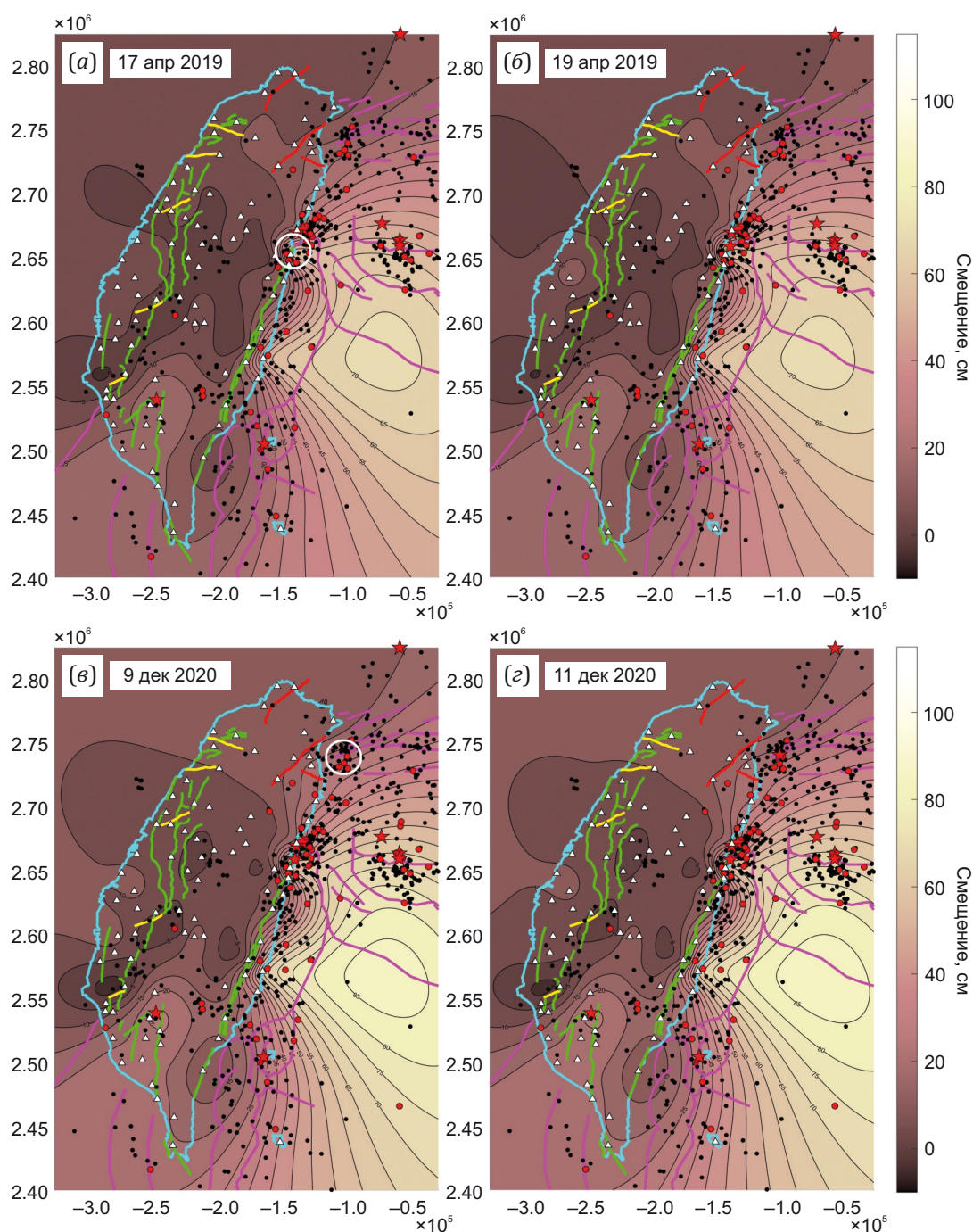


Рис. 5. Формирование и разрушение области дефицита смещения в связи с землетрясениями 18 апреля 2019 г. (M6.1) (а, б) и 10 декабря 2020 г. (M6.1) (в, г). Общую легенду см. на рис. 3.

Fig. 5. Formation and destruction of the displacement deficit region in connection with the earthquakes of April 18, 2019 (M6.1) (а, б) and December 10, 2020 (M6.1) (в, г). See Fig. 3 for a common legend.

Немногим более чем через год эта ветвь дефицита движений продолжила разрушение за счет очередного землетрясения 18 апреля 2019 г. M6.1 в области Хуалянь (см. рис. 6, б). К концу 2020 г. миграция сильных событий продолжилась на север в акваторию Филиппинского моря в область развития субдукционного процесса между структурами островной дуги Рюкю и океанического желоба Окинава. Информация о величине внутренних смещений для этого района не

слишком надежна, так как изолинии здесь получены интерполяцией. Тем не менее они показывают относительно плотную зону медленных движений.

Землетрясение 24 октября 2021 г. (M6.2) не продемонстрировало разуплотнения поверхности земной коры в области эпицентра (см. рис. 6, б). Возможно, это связано с относительно большой глубиной гипоцентра – 69 км. Следующее землетрясение, 3 января 2022 г., происходит в зоне субдукции в акватории Филиппинского

моря (см. рис. 6, в, г). Землетрясение 22 марта 2022 г. М6.7 происходит вблизи побережья и в зоне перехода от быстрых движений земной коры к медленным (см. рис. 6, г). Увеличения зоны быстрых движений не произошло, возможно, из-за того, что оно несущественно затронуло побережье.

На окончании юго-западной ветви области дефицита движений 17–18 сентября 2022 г. (рис. 7, а, б) произошла пара сильнейших, до этого момента, землетря-

сений (М6.5 и М6.9). Эти события значительно разрушили консолидированную область земной коры (рис. 7, б) в южной части разломной зоны Продольной долины. При этом глубина их гипоцентров составила 10 км, свидетельствуя об их приповерхностном воздействии на земную кору.

Землетрясение Хуалынь 2 апреля 2024 г. (М7.4), сильнейшее и самое смертоносное за прошедшее десятилетие, произошло в северной ветви зоны минимальных

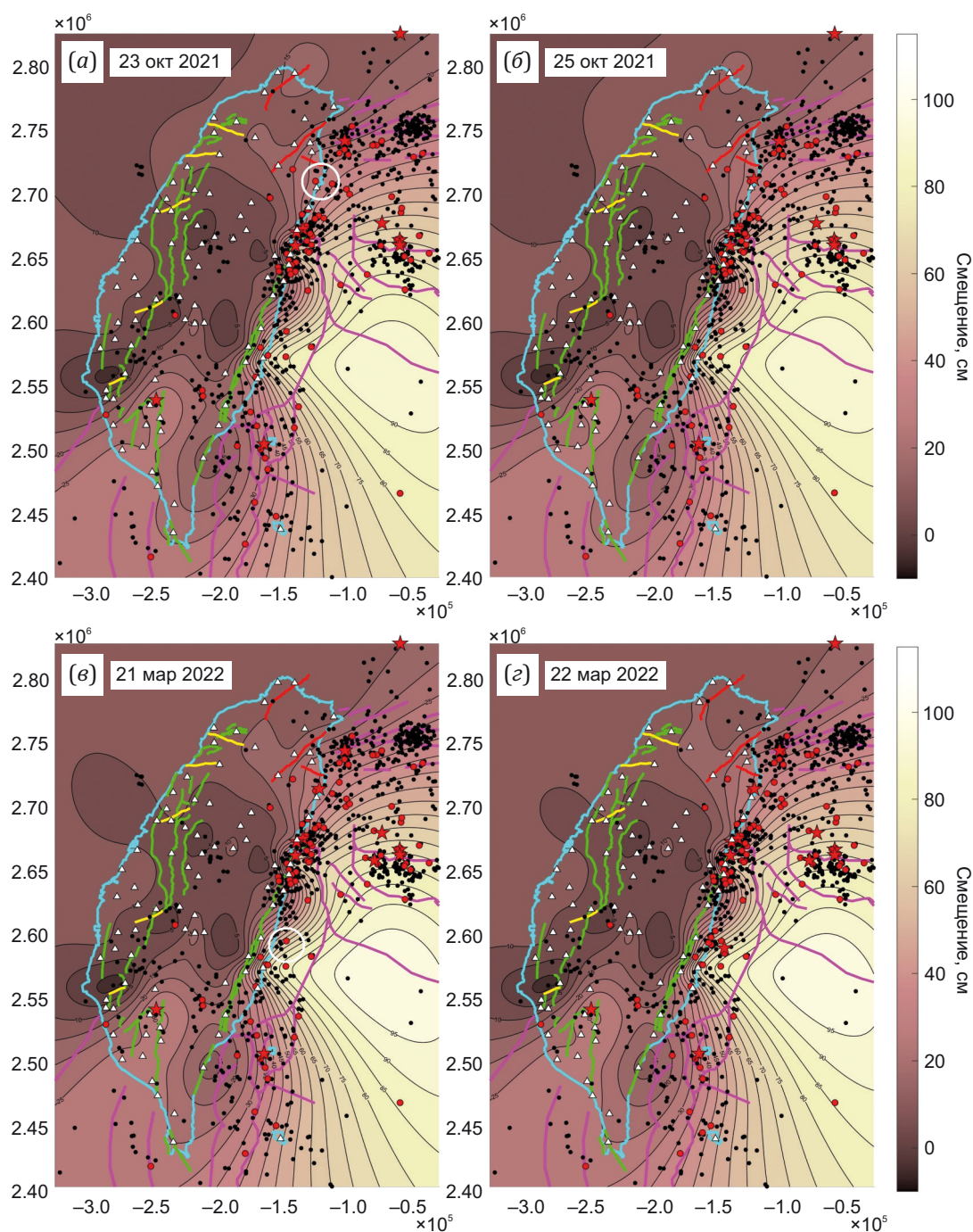


Рис. 6. Формирование и разрушение области дефицита смещения в связи с землетрясениями 24 октября 2021 г. (М6.2) (а, б) и 22 марта 2022 г. (М6.7) (г, з). Общую легенду см. на рис. 3.

Fig. 6. Formation and destruction of the displacement deficit region in connection with the earthquakes of October 24, 2021 (M6.2) (а, б) and March 22, 2022 (M6.7) (г, з). See Fig. 3 for a common legend.

внутренних движений. Оно не продемонстрировало разупрочнения этой области вблизи его эпицентра (рис. 7, г). Глубина его гипоцентра составила ~ 40 км. Это вдвое глубже, чем у предыдущих событий 2022 г., вызвавших наиболее ошутимое разрушение зоны дефицита движений. На следующие сутки примерно на 30 км севернее на глубине 13 км произошел сильный афтершок М6.4. Это событие проявило себя, изменив конфигурацию зоны дефицита внутренних смещений

(рис. 7, г). Следует отметить, что отсутствие значительных проявлений на дневной поверхности после сильного сейсмического события характерно, например, для землетрясения Кайкоура (Новая Зеландия, М7.8) 13 ноября 2016 г. [Kaftan et al., 2024a].

Спустя две недели после сильнейшего землетрясения апреля 2024 г. на острове сформировалась область малых внутренних смещений, представляющая интерес для выявления зоны накопления наибольших

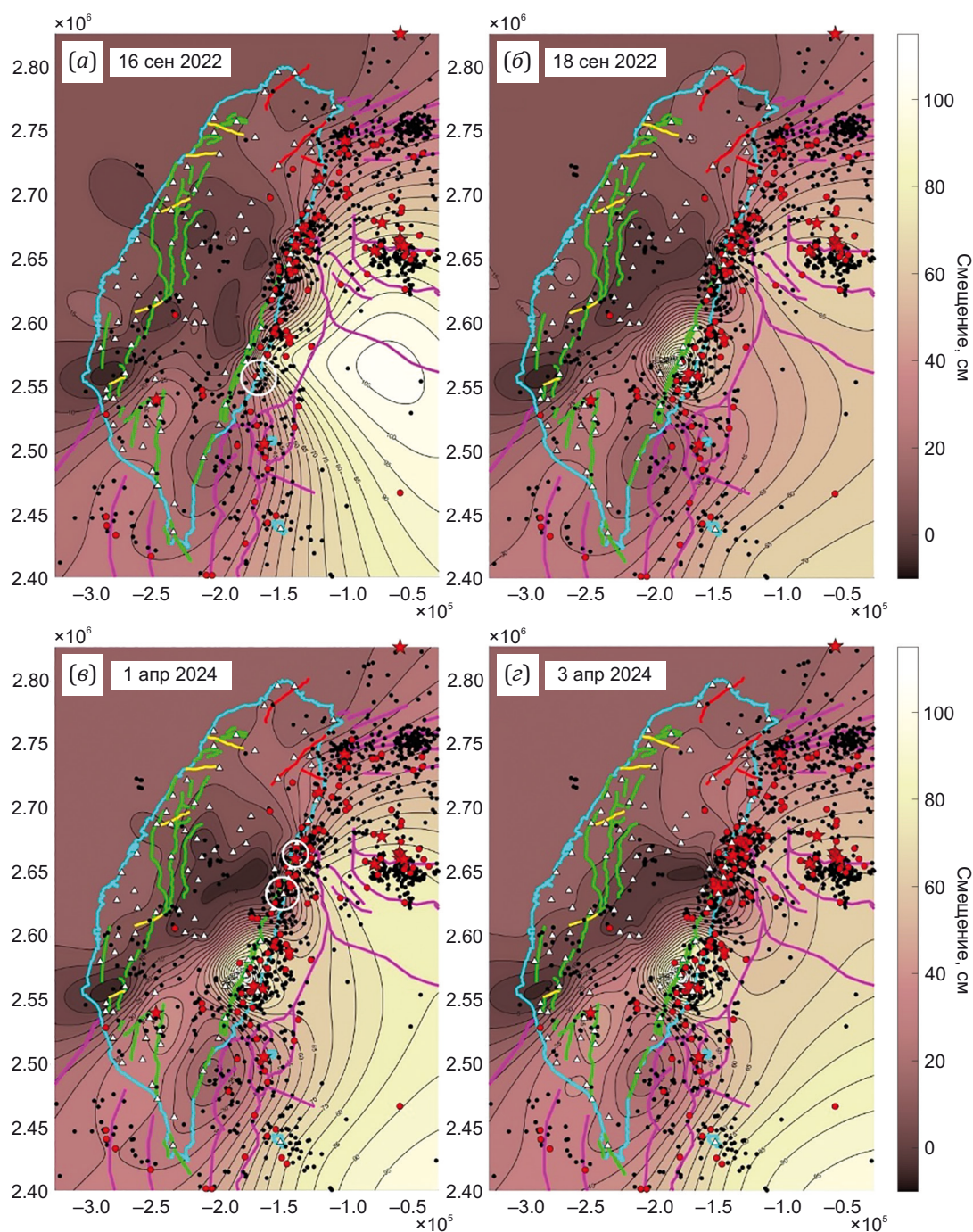


Рис. 7. Формирование и разрушение области дефицита смещения в связи с дублетами 17–18 сентября 2022 г. (М6.5 и М6.9) (а, б) и 2–3 апреля 2024 г. (М7.4 и М6.4) (г, з). Общую легенду см. на рис. 3.

Fig. 7. Formation and destruction of the displacement deficit region in connection with doublets of September 17–18, 2022 (M6.5 and M6.9) (a, b) and April 2–3, 2024 (M7.4 and M6.4) (g, z). See Fig. 3 for a common legend.

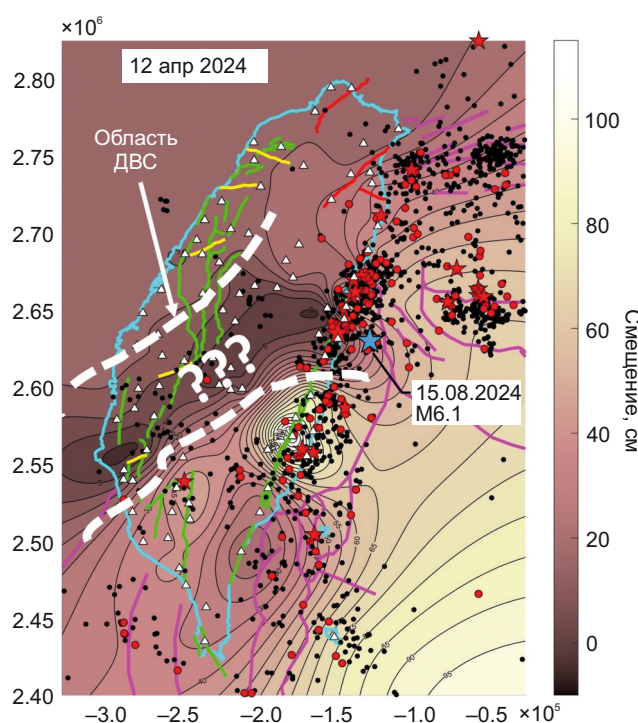


Рис. 8. Зона дефицита внутренних смещений, «накопленная» за десятилетие.

Область ограничена белыми пунктирными линиями. Условные обозначения смотри на рис. 3. Синей звездочкой отмечено новое сильное землетрясение M6.1, произошедшее в северо-восточной части области дефицита накопленных смещений уже после поступления статьи в журнал.

Fig. 8. The zone of inner displacement deficit, accumulated over a decade.

The area is limited by white dashed lines. See Fig. 3 for a common legend. The blue star marks a new strong M6.1 earthquake, which occurred in the northeastern part of the area of accumulated displacement deficit after the article had already been submitted to the journal.

напряжений и упрочнения земной коры (рис. 8). Интересно рассмотреть ее расположение в связи с проявленной сейсмичностью и тектоникой региона. Первое, что «бросается в глаза», это то, что восточное окончание этой области совпадает с зоной высочайшей сейсмичности за период исследований. Сильнейшее событие апреля 2024 г. (M7.4) несущественно нарушило эту зону малых движений, что видно по тесному прилеганию его эпицентра к границе области минимума движений.

Интересно то, что здесь сконцентрировано подавляющее большинство сильных и умеренных сейсмических событий. В тектоническом отношении здесь осевая линия глубоководного желоба Рюкю соединяется с береговой линией островной суши, что должно препятствовать процессу субдукции Филиппинской плиты под Евразийскую [Malavieille et al., 2019] в желобе Рюкю и способствовать быстрому росту сейсмогенерирующих напряжений в этом месте. Аналогичная ситуация имеет место на западной границе зоны дефицита смещений. В этой области происходит соединение линии глубоководного желоба Манила с береговой линией о-ва Тайвань. В отличие от восточной границы минимальных движений, здесь, наоборот, континентальная кора Евразийской тектонической плиты погружается под океаническую кору Филиппинской плиты

[Malavieille et al., 2019] в Манильском желобе. Островная территория является препятствием для продвижения континентальной плиты. Это также должно способствовать накоплению здесь сейсмогенных напряжений и последующей их разрядке за счет сильных землетрясений. По-видимому, вся область дефицита внутренних движений, вытянутая по направлению ЮЗ-СВ, маркирует зону критических напряжений земной коры, генерируемых коллизией Филиппинской и Евразийской тектонических плит.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория о-ва Тайвань и окрестностей является в высшей степени сейсмоактивной. Этому способствует высокая подвижность земной коры на стыке взаимодействия Евразийской и Филиппинской глобальных тектонических плит.

Геодинамическая характеристика, именуемая нами дефицит внутренних движений (смещений), сформировалась в срединной части территории острова. Ее пространственно-временная эволюция продемонстрировала наличие зон повышенной прочности земной коры, с которыми связаны многие сильные землетрясения 2014–2024 гг. Большинство землетрясений с момента образования зоны дефицита внутренних смещений происходило в местах перехода от медленных

движений к быстрым. Таковыми были сильные землетрясения 2016–2024 гг. Эти обстоятельства свидетельствуют о том, что сильные землетрясения готовятся в местах повышенной прочности (консолидации) земной коры. Эти области маркируют места возникновения будущих сильных землетрясений. После сейсмических событий они разрушаются. Выявленные закономерности напоминают концепцию сейсмических брешей (затиший) в зонах субдукции, где впоследствии происходят сильнейшие землетрясения, согласно некоей клавишной последовательности поочередно закрывая всю сейсмическую зону [Fedotov et al., 2007].

Интересными фактами являются те обстоятельства, что, в согласии с конфигурацией зоны дефицита внутренних движений, в исследуемом районе существуют области высокой концентрации сильных землетрясений. К основным из них относится зона в акватории Филиппинского моря и две области на восточном побережье острова. Первая существует в зоне активной подводной тектоники процесса океанической субдукции Филиппинской плиты под Евразийскую. Две других относятся к сейсмической активности разломной зоны Продольной долины. Северный центр сейсмической активности этой зоны расположен в районе г. Хуалынь. Это место является зоной сочленения желоба Рюкю с подошвой горного пояса Тайваня, маркируемой зоной разломов Продольной долины за счет столкновения континентальной и океанической глобальных литосферных плит. Для нее характерна самая высокая концентрация сильных землетрясений региона.

Примерно в ста километрах к югу от этого тектонического узла, в районе города Чэнгун, сосредоточена еще одна область концентрации сильных сейсмических событий. Картина распределения дефицита внутренних движений на рис. 7, г, свидетельствует о значительном снятии здесь сейсмогенерирующих напряжений. На момент завершения исследований за десять лет здесь накопились смещения более 1 м.

Заключительная конфигурация области дефицита внутренних движений представляет собой вытянутую диагонально простирающую восточного побережья Тайваня достаточно узкую полосу от узла столкновения Филиппинской плиты с островной территорией до точки погружения континентальной Евразийской плиты под островную кору по глубоководному желобу Манила.

Таким образом, на основании нашего исследования мы полагаем, что будущие сильные сейсмические события могут иметь место в пределах этой диагональной полосы как в области Хуалынь, так и на юго-западном побережье Тайваня возле города Тайнань. В районе Хуалынь это уже подтвердилось во время прохождения процедуры рецензирования статьи (рис. 8). В центре зоны концентрации дефицита накопленных смещений 22 ноября 2017 г. ранее уже произошло умеренное сейсмическое событие M5.1. Оно не отразилось в ослаблении дефицита движений в центре аномальной зоны. Заметим, что землетрясения такой силы не

приводят к значительным нарушениям на земной поверхности [Melnikov, Golikov, 2017], регистрируемым геодезическими методами.

Рекомендуем интересующимся исследователям сейсмических процессов изучить видеоанимацию [Kaftan et al., 2024b].

5. 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.

6. 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.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., 2018. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. *Eos*, 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.

Chang J.-M., Chao W.-A., Yang Ch.-M., Huang M.-W., 2024. Coseismic and Subsequent Landslides of the 2024 Hualien Earthquake (M7.2) on April 3 in Taiwan. *Landslides* 21, 2591–2595. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02312-x>.

Dokukin P., Güvenaltın M.A., Kaftan V., Toker M., 2023a. Synoptic Analysis of Crustal Deformation of the Strongest Earthquakes in Eastern Anatolia (Turkey) 2009–2023. In: *Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquakes Prediction. Proceedings of the III All-Russian Scientific Conference with International Participation* (October 25–26, 2023). IEPT RAS, Moscow, p. 285–289.

Dokukin P.A., Güvenaltın M.A., Kaftan V., Toker M., 2023b. Co- and Pre-seismic Crustal Deformations Related to Large Earthquakes Between Years of 2009 and 2023 Using Continuous CORS-TR GNSS Observations in the Anatolian Diagonal (Turkey). *Russian Journal of Earth Sciences* 23 (5), ES5005. <https://doi.org/10.2205/2023es000877>.

Fedotov S.A., Solomatin A.V., Chernyshev S.D., 2007. A Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril-Kamchatka Island Arc for the Period 2006–2011 and a Successful Forecast of the M_s=8.2 Middle Kuril Earthquake of November 15, 2006. *Journal of Volcanology and Seismology* 1 (3), 143–163. <https://doi.org/10.1134/S0742046307030013>.

Galgana G., Hamburger M., McCaffrey R., Corpuz E., Chen Q., 2007. Analysis of Crustal Deformation in Luzon, Philippines Using Geodetic Observations and Earthquake Focal Mechanisms. *Tectonophysics* 432 (1–4), 63–87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.12.001>.

Grafarend E., Schaffrin B., 1974. Unbiased Free Net Adjustment. *Survey Review* 22 (171), 200–218. <https://doi.org/10.1179/sre.1974.22.171.200>.

Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I., Dzeboev B.A., Losev I.V., 2020. The Velocities of Modern

Horizontal Movements of Earth Crust in the South Sector of Yenisei Ridge According to GNSS Observations. *Doklady Earth Sciences* 493, 544–547. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20070077>.

Kaftan V.I., 2021a. 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, 97–106. <https://doi.org/10.1134/S0742046321010115>.

Kaftan V.I., 2021b. Crustal Weather and Strong Earthquakes. Deficit of Modern Movements and Deformation Waves from GNSS Observations. In: *Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquake Prediction. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference with International Participation (September 29–30, 2021). IEPT RAS, Moscow*, p. 54–55 (in Russian) [Кафтан В.И. Кордовая погода и сильные землетрясения. Дефицит современных движений и деформационные волны по ГНСС наблюдениям // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Тезисы докладов II всероссийской конференции с международным участием (29–30 сентября 2021 г.). М.: ИТПЗ РАН, 2021. С. 54–55].

Kaftan V.I., Dokukin P.A., Manevich A.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V., 2024a. Deformation Interaction of Strong Earthquakes of 2010–2016 in the Zone of Influence of the Hikurangi Superplume (New Zealand) According to GPS Observations. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0735 (in Russian) [Кафтан В.И., Докукин П.А., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Деформационное взаимодействие сильных землетрясений 2010–2016 гг. в зоне влияния суперплюма Хикуранги (Новая Зеландия) по данным GPS-наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 1. 0735]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0735>.

Kaftan V.I., Kaftan I., Gök E., 2021. Crustal Movements and Deformations in Eastern Turkey in Connection with the Van Earthquake (October 23, 2011, Mw=7.2): Study from GPS Data. *Izvestia, Physics of the Solid Earth* 57, 30–44. <https://doi.org/10.1134/S1069351321030071>.

Kaftan V.I., Melnikov A.Yu., Dokukin P.A., 2024b. Evolution of Crustal Inner Displacement Deficit in Connection with Strongest Taiwan's Earthquakes Migration According to GPS Data from 2014 to 2024. *ESDB Repository, GCRAS, Moscow*. <https://doi.org/10.2205/ESDB-Taiwan-quake-2014-2024>.

Kaftan V.I., Tatarinov V.N., 2021. An Analysis of Possibilities of GNSS Local Strain Monitoring Networks in Earthquake-Prone Areas. *Journal of Volcanology and Seismology* 15, 379–386. <https://doi.org/10.1134/S074204632106004X>.

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 (in Russian) [Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Дол-

говременные изменения движений и деформаций земной коры до и во время серии землетрясений Кумамото (2016 г., Япония) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 1. 0570]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0570>.

Kanwal M., 2024. Assessing the Impact of the 2024 Hualien Earthquake in Taiwan (April 6, 2024). Available from: <https://ssrn.com/abstract=4786199> (Last Accessed May 15, 2024).

Lemenkova P., 2021. Using GMT for 2D and 3D Modeling of the Ryukyu Trench Topography, Pacific Ocean. *Miscellanea Geographica* 25 (4) 213–225. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2020-0038>.

Malavieille J., Dominguez S., Lu C.-Y., Chen C.-T., Konstantinovskaya E., 2019. Deformation Partitioning in Mountain Belts: Insights from Analogue Modelling Experiments and the Taiwan Collisional Orogen. *Geological Magazine* 158 (1), 84–103. <https://doi.org/10.1017/S0016756819000645>.

Melnikov A.Yu., Golikov V.D., 2017. Analysis of the Geodetic Network Points Displacements Due to the Brawley Swarm Earthquake M5.3, 2012.08.26 According to GPS Observations. *Geodesy and Cartography* 78 (11), 22–28 (in Russian) [Мельников А.Ю., Голиков В.Д. Анализ изменения положения пунктов геодезической сети в связи с землетрясением «Brawley Swarm Earthquake M5.3, 26.08.2012» по данным GPS-наблюдений // Геодезия и картография. 2017. Т. 78. № 11. С. 22–28]. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2017-929-11-22-28>.

Poygina S.G., Petrova N.V., Boldyreva N.V., 2020. Global Earthquakes. Earthquakes of the Northern Eurasia 23, 235–243 (in Russian) [Пойгина С.Г., Петрова Н.В., Болдырева Н.В. Сильные землетрясения Земли // Землетрясения Северной Евразии. 2020. Т. 23. С. 235–243]. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.23>.

Sella G.F., Dixon T.H., Mao A., 2002. REVEL: A Model for Recent Plate Velocities from Space Geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107 (B4), 11–1–11–30. <https://doi.org/10.1029/2000JB000033>.

Styron R., Pagani M., 2020. The GEM Global Active Faults Database. *Earthquake Spectra* 36 (1), 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>.

Sun Y., Liu M., Dong S., Zhang H., Sci Y., 2015. Active Tectonics in Taiwan: Insights from a 3-D Viscous Finite Element Model. *Earthquake Science* 28, 353–363. <https://doi.org/10.1007/s11589-015-0137-9>.

Tang X., Guo R., Li L., Xu Y., Xu J., Zheng Y., Sun H., 2024. Earthquake Interactions in Eastern Taiwan: Insight from the 2024 Mw7.3 Hualien Earthquake. *Seismological Research Letters* 96 (1), 9–18. <https://doi.org/10.1785/0220240230>.

Welsch W., 1979. A Review of the Adjustment of Free Networks. *Survey Review* 25 (194), 167–180. <https://doi.org/10.1179/sre.1979.25.194.167>.

Yu S.-B., Chen H.-Y., Kuo L.-Ch., 1997. Velocity Field of GPS Stations in the Taiwan Area. *Tectonophysics* 274 (1–3), 41–59. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00297-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00297-1).