

УДК 551.242:551.21

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОКРЕСТНОСТИ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА (П-ОВ КАМЧАТКА) С 2015 ПО 2023 гг.

© 2025 г. В. И. Кафтан^{1,*}, И. К. Миронов^{2,**}, А. И. Маневич^{1,3,***},
Р. В. Шевчук^{1,****}, В. М. Магуськин²

¹Геофизический Центр РАН, г. Москва, Россия

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”, г. Москва, Россия

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

**E-mail: taliks123@mail.ru

***E-mail: a.manevich@gcras.ru

****E-mail: r.shevchuk@gcras.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024 г.

После доработки 17.05.2024 г.

Принята к публикации 19.05.2024 г.

Представлены результаты исследований современных движений и деформаций по данным ГНСС-наблюдений в районе Авачинского вулкана в 2015–2023 гг. Исследования Авачинского вулкана особенно важны, поскольку он является активным вулканом, ближайшим к административному центру Камчатского края. Выявлены интересные особенности локальной геодинамики района, связанные с процессом субдукции тектонических плит, состоянием Авачинского вулкана и сильным землетрясением в окрестности наблюдательной сети. Проанализированы горизонтальные и вертикальные смещения, деформации дилатации и полного сдвига, а также характеристики дефицита “внутренних” смещений. В южной части сети происходит накопление деформации сжатия из-за давления со стороны зоны субдукции. Вблизи кратера вулкана накапливается деформация растяжения при отсутствии значимого поднятия. По характеристикам дефицита внутренних смещений показана реакция сети ГНСС на землетрясение М6.5 (03.04.2023 г.) Все изменения характеристик движений и деформаций земной коры продемонстрировали примерно двухлетнюю цикличность. В дальнейших наблюдениях можно будет оценить устойчивость этого явления. Также отмечается необходимость расширения сети ГНСС-наблюдений на северный склон и подошву Авачинского вулкана для более детального геодезического мониторинга его состояния.

Ключевые слова: современные движения земной коры, деформации, ГНСС, вулканизм, сейсмичность, субдукция.

DOI: 10.31857/S0002333725030093, EDN: FFGKDU

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка (Российская Федерация) расположен в одном из самых сейсмоактивных регионов мира. Подавляющее большинство землетрясений территории России происходит в регионе Камчатки и Курильских островов. Крупнейшими формами рельефа Камчатки являются Срединный хребет, Центральная

Камчатская депрессия, горстовое поднятие Восточно-Камчатский хребет, вулcano-тектоническая депрессия восточной Камчатки и поднятия полуостровов восточной Камчатки. Климат Камчатки умеренно континентальный и субарктический. Зимние температуры достигают -30°C (на севере и в горах достигают -50°C). Летом средние температуры порядка $+20^{\circ}\text{C}$.

На полуострове Камчатка расположено около 160 вулканов, из которых 29 являются потенциально активными. Авачинский вулкан входит в Авачинско-Корякскую группу вулканов, сформированную вулканами Авачинский, Корякский, Козельский, Аиг, Арик. Вулканические постройки расположены в грабене Авачинской депрессии. Сложены базальтами, адензибазальтами и андезитами. Преимущественный состав излившихся лав средний и основной [Действующие вулканы ..., 1991; Масуренков и др., 1991]. Вулкан Авачинский (высота 2751 м) морфологически относится к типу Сомма-Везувий.

Из опубликованных материалов с 1937 г. известны исторически задокументированные извержения Авачинского вулкана в 1737, 1772, 1779, 1827, 1855, 1878, 1881, 1894–1895, 1901, 1909, 1926, 1938, 1945 гг. [Гущенко, 1979] и 1991, 2001 гг. [Гирина и др., 2018; Мелекесцев и др., 1994]. Это позволяет оценить среднюю повторяемость извержений один раз в 19+15 лет. Этот результат позволяет предполагать вероятность возникновения очередного извержения не менее 68% в течение примерно десяти лет до 2035 г.

Авторы исследования [Базанова и др., 2001] полагают, что в ближайшие сотни лет характер эруптивной деятельности вулкана не изменится, если не произойдет катастрофических событий, кардинально изменяющих систему питания. При этом отмечается связь силы будущего извержения с периодом покоя вулкана. На сегодня время от момента последнего извержения 2001 г. уже превышает среднее значение периода повторяемости.

Авачинский вулкан является активным вулканом, ближайшим к крупному населенному пункту, административному центру Камчатского края, в котором проживает около 200 тысяч человек. Это обстоятельство является важным для проведения междисциплинарного геофизического мониторинга состояния вулкана, построения специальных наблюдательных сетей и анализа полученных наблюдений.

Одним из важных компонентов комплексного мониторинга районов высокой сейсмической и вулканической активности являются геодезические геодинимические полигоны (ГДП). Настоящее исследование посвящено рассмотрению истории и анализу современных ГНСС-наблюдений в области Авачинского вулкана

и г. Петропавловска-Камчатского на протяжении около десяти последних лет.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ, ГНСС-ИЗМЕРЕНИЯ И ПОСТОБРАБОТКА

Во второй половине прошедшего XX столетия на территории полуострова Камчатка силами подразделений Главного управления геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК при СМ СССР) были созданы геодезические ГДП сейсмопрогноностического назначения и наблюдения за вулканической активностью. Выполнение повторных геодезических измерений с использованием классических геодезических средств и методов осуществлялось Хабаровским аэрогеодезическим предприятием (АГП Дальаэрогеодезия), научное сопровождение и интерпретация результатов наблюдений осуществлялось Центральным НИИ геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК) и Институтом вулканологии Дальневосточного научного центра Академии наук СССР (ИВ ДВНЦ АН СССР), который также развивал собственные локальные сети геодинимического назначения.

Необходимо упомянуть ученых и специалистов, внесших свой вклад в создание ГДП, научно-методическое сопровождение повторных измерений, анализ и интерпретацию полученных данных. Это известные ученые ГУГК при СМ СССР Л.А. Кашин, Л.П. Пеллинен, О.М. Остач, Л.И. Серебрякова, В.Н. Дмитроченков; сотрудники АГП Дальаэрогеодезия Ю.П. Никитенко, А.П. Кириенко, Г.А. Шароглазова, В.А. Шулман; исследователи ДВНЦ АН СССР С.А. Федотов, М.А. Магуськин, М.Д. Герасименко, Н.А. Жаринов, В.Е. Левин.

При этом основными измерительными средствами являлись повторное точное нивелирование, линейно-угловые построения с использованием современных светодальномеров и высокоточных теодолитов, высокоточные современные гравиметры.

В 70–80-х годах прошлого столетия на Камчатке были построены и функционировали около десятка ГДП. Среди них основными были Карымский, Ключевской, Горелый, Шипунский, Усть-Камчатский и Петропавловский ГДП.

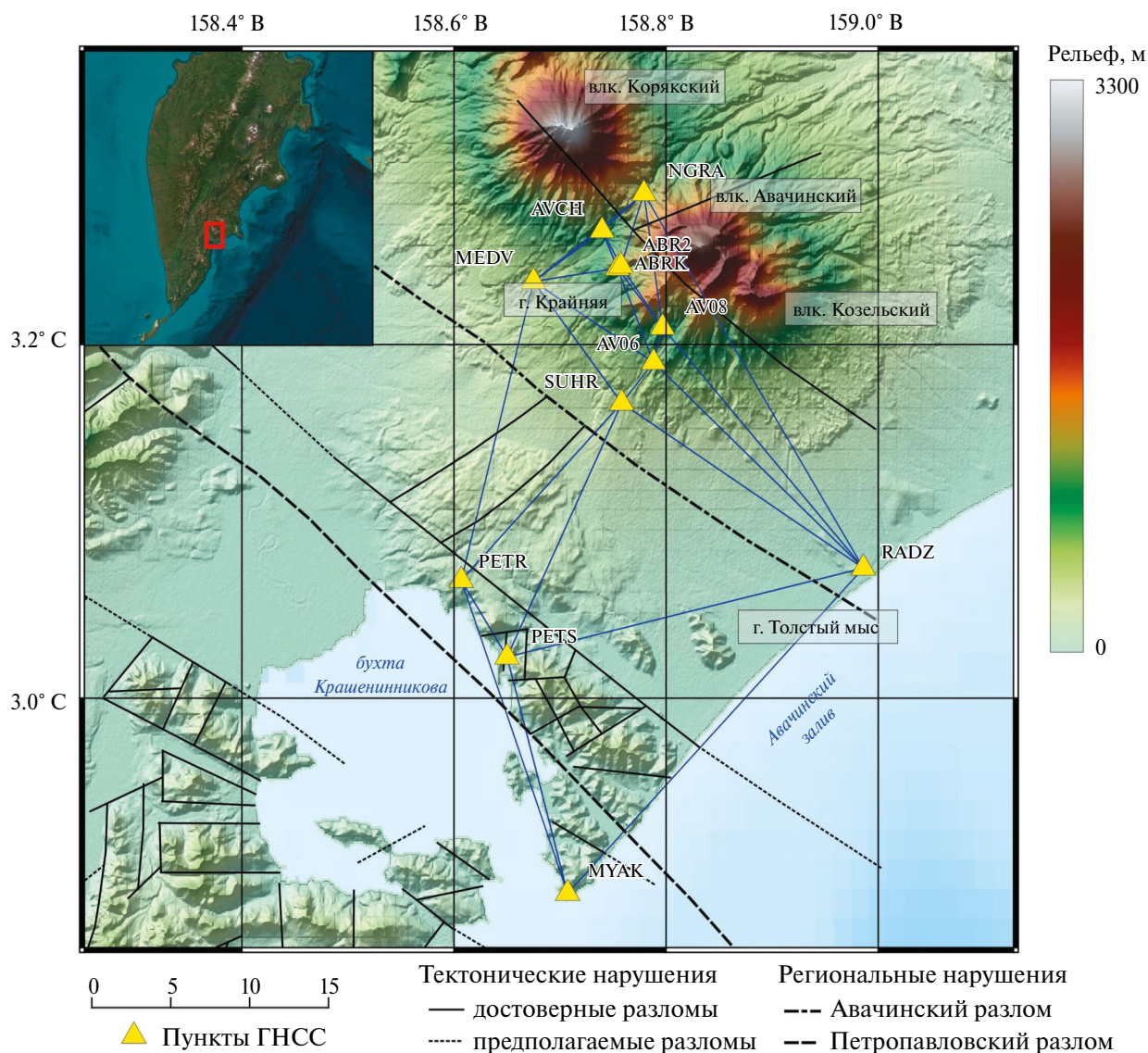


Рис. 1. Район исследований, сеть ГНСС и разломная тектоника.

Точность повторных измерений на ГДП обобщенно составляла $0.5''$ для угловых, 1.5×10^{-6} для линейных и менее 1 мм/км для точного нивелирования.

Обстоятельный обзор и анализ работ по комплексному региональному и локальному мониторингу современных движений земной коры Камчатки и Командорских островов классическими и современными геодезическими средствами наблюдений за 40-летний период представлен в работе [Левин и др., 2014].

В годы начала геодинимического мониторинга Камчатки, ГДП в районе города и Авачинского вулкана именовался Петропавловским и охватывал весьма обширную территорию

площадью свыше 2.5 тыс. кв. км [Кириенко, Никитенко, 1986]. Одновременно Институтом вулканологии создавались деформационные площадки — локальные линейно-угловые построения в основном на городской территории [Миронов, Магуськин, 2019].

Пункты линейно-угловой сети Петропавловского ГДП, представляющие собой стандартные пункты Государственной геодезической сети 1 и 2 классов, на местности сохранились и могут быть использованы для продолжения повторных измерений. Они закреплены стандартными геодезическими центрами, не имеющими возможности принудительного центрирования измерительных средств.

В настоящее время в данном районе функционирует менее обширная сеть ГНСС-наблюдений Петропавловск-Авачинского ГДП (рис. 1). Она охватывает территорию Петропавловска-Камчатского и юго-западный склон Авачинского вулкана.

Наблюдательная сеть ГДП состоит из 11 пунктов (рис. 1). Пункты PETR, PETS, MYAK и RADZ относятся к сети KAMNET Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единой геофизической службы РАН” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и располагаются в районе г. Петропавловск-Камчатский. Остальные пункты расположены на западном и южном склонах Авачинского вулкана.

Геодезические пункты заложены на отдельно стоящих железобетонных пилонах, обеспечивающих надежность установки ГНСС-антенн и приемников (рис. 2). На постоянно действующих пунктах также применяется система принудительного центрирования для более точного закрепления положения антенны на пункте.

В наблюдениях используются двухчастотные геодезические ГНСС приемники Leica Geosystems GR10 с антеннами AR10 и AR25. Станции AVCH, PETR, PETS, MYAK и RADZ являются постоянно действующими пунктами, на остальных пунктах измерения проводятся 2 раза в год в марте и в сентябре, в режиме “статика” с 30-секундной дискретизацией и маской возвышения спутников от 5°. Продолжительность эпох измерений составляет не менее 2 суток. Для уменьшения ошибок положения фазовых центров антенн, в каждом цикле наблюдений на каждом пункте использованы одинаковые комплекты оборудования.

Обработка данных осуществлялась с использованием программного обеспечения GAMIT/GLOBK. При этом использовались финальные эфемериды спутников, представленные Международной службой ГНСС (International GNSS Service — IGS), параметры вращения земли Международной службы вращения Земли и систем отсчета (International Earth Rotation and Reference Systems Service — IERS), для учета ионосферной задержки применялась модель IONEX, а тропосферная поправка рассчитывалась по модели VMF.

Результатом обработки являются осредненные за период наблюдения координаты пунктов, определенные со средней квадратической ошибкой (СКО) в плане 3–4 мм и по высоте 8–10 мм.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Основой вычислений векторов смещений и деформаций земной коры явились временные ряды прямоугольных пространственных координат, полученных из постобработки циклов ГНСС-измерений в отсчетной основе ITRF14. Эти координаты преобразовывались в плановые координаты e и n проекции UTM и геодезические высоты H .

Для удобства последующей интерпретации нерегулярные временные ряды координат преобразовывали в регулярную форму путем интерполяции сплайнами Эрмита. Результат интерполяции одного из рядов для пункта AV08 представлен на рис. 3, где продемонстрирована близость интерполированных координат к измеренным на уровне первых миллиметров.

Вычислялись и анализировались так называемые “внутренние” смещения земной поверхности [Gvishiani et al., 2022]. 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

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

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

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

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

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

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix}, \quad (1)$$



(а)



(б)

Рис.2. Пункты ГНСС-наблюдений Петропавловск-Авачинского ГДП: (а) — скальный геодезический центр; (б) — железобетонный пилон.

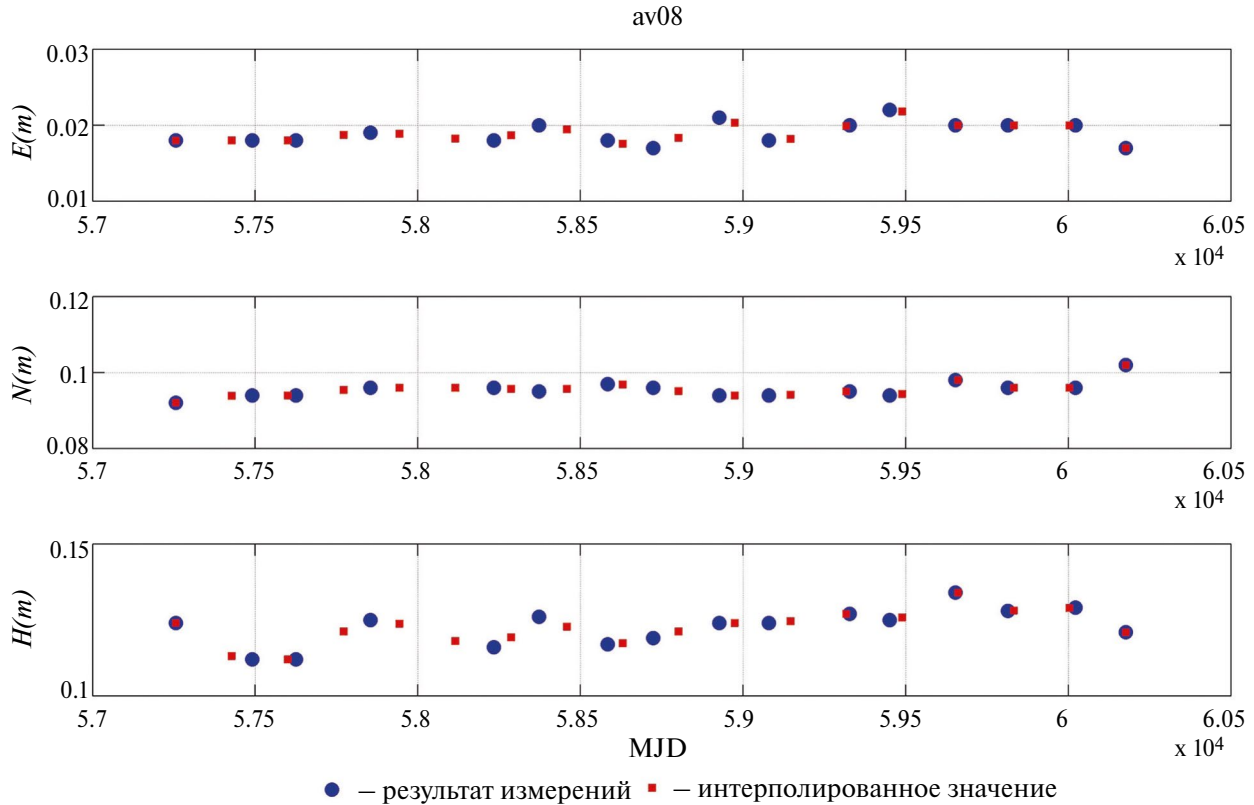


Рис. 3. Результаты интерполяции нерегулярных циклов измерений в регулярные временные ряды.

элементы которого являются частными производными смещений u_n и u_e по осям координат n и e :

$$\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}, \varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e} \quad (2)$$

и

$$\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right), \quad (3)$$

где относительный сдвиг:

$$\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}.$$

В итоге анализировались деформации дилатации $\Delta = \varepsilon_n + \varepsilon_e$ и полного сдвига $\gamma = \left((\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2 \right)^{1/2}$.

Выбор именно этих типов деформации обусловлен характерным поведением земной коры вблизи активных вулканов, где напряжения в глубинном вулканическом очаге явно выражаются в деформациях растяжения/сжатия

на поверхности [Кафтан, Родкин, 2018; 2019; 2022; Энман, 1984]. Компоненты деформаций вычислялись согласно методу, описанному [Wu et al., 2006]. Значения деформаций вычислялись по значениям смещений пунктов треугольников Делоне (рис. 1). Ввиду существенной неравновеликости треугольников, значения дилатации приводились к средней площади равностороннего треугольника сети P_m со стороной, равной средней стороне всех треугольников сети [Kaftan, Melnikov, 2017]. Далее вычислялся масштабный фактор $m = P_i/P_m$. Масштабированная дилатация вычислялась как $\Delta_m = \Delta P_m$.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первые определения горизонтальных деформаций и вертикальных движений земной коры в большом Петропавловск-Камчатском ГДП определялись в двух интервалах повторений 1974–1980 гг. и 1980–1982 гг. [Кириенко, Никитенко, 1986]. В первом периоде были зарегистрированы площадные растяжения порядка $3 \times 10^{-}$

⁶, что находится на уровне ошибок измерений. При этом наблюдалось значительное опускание по направлению к вершине Авачинского вулкана более 4×10^{-6} . Во втором периоде происходили обратные движения. Максимальные поднятия в направлении Авачинского вулкана составили менее 2×10^{-6} . Площадные деформации сжатия в среднем достигали 4×10^{-6} . Авторы объясняют перемену знака деформаций сменой региональных напряжений [Кириенко, Никитенко, 1986]. Необходимо отметить, что именно поднятия в направлении Авачинского вулкана зарегистрированы за 9 лет до его извержения 1991 г. Тем не менее авторы объясняют полученные результаты движениями по активным разломам. В целом в среднем по сети подъемы земной поверхности соответствуют сжатиям и, наоборот, опускания согласуются с растяжениями, что объясняется характером региональной геодинамики, т.е. механизмом процесса субдукции, где поднятия определяются боковым давлением со стороны Тихоокеанской тектонической плиты.

Регулярные светодальномерные наблюдения из обсерватории “Мишенная” (Петропавловск-Камчатский) в районе Авачинского залива в конце прошлого столетия позволили выявить устойчивый тренд деформации сжатия и упругие бухтообразные вариации деформации территории Авачинского залива [Левин и др., 2014].

Исследования [Магуськин и др., 2017] с 1962 по 1995 гг. методом высокоточного нивелирования по профилям, простирающимся от города к вулканической постройке, показали нарастание знакопеременных вертикальных движений по мере приближения к вулкану до расстояния 6–7 км от кратера. Колебательный характер этих движений связывается с динамикой активизации тектонических процессов в зоне субдукции.

Современная сеть ГНСС-наблюдений незначительно перекрывает классическую сеть Петропавловск-Камчатского ГДП. Рассмотрим результаты определения движений и деформаций в этой сети.

Эволюция дилатации земной коры представлена в виде последовательности кадров на рис. 4. Представлены карты накопленной дилатации с начала 2017 г. до конца 2023 г. Результаты определений движений и деформаций с 2015

по 2016 гг. на последующих рисунках не показаны ввиду их малости на уровне ошибок измерений.

Ход деформации демонстрирует почти монотонный, значимый на уровне точности, рост деформации сжатия, образующей концентрический экстремум вокруг горы Толстый мыс. Замечаются пульсации эволюции сжатия с периодом примерно 2 года. При этом юго-западная сторона вулканической постройки испытывает монотонное накопление растяжений до 3×10^{-6} .

Следует отметить, что характер выявленных деформаций довольно близок к накоплению деформации сжатия и бухтообразным ее колебаниям, зарегистрированным в конце прошлого столетия светодальномерными наблюдениями из обсерватории Мишенная [Левин и др., 2014]. Эти тенденции заслуживают обстоятельного и детального сравнительного анализа скоростей и периодичностей наблюдаемых деформаций.

В октябре–декабре 2019 г. произошла активизация слабых сейсмических событий под конусом и в радиусе 8 км от Авачинского вулкана [Сенюков и др., 2021; Фирстов и др., 2021]. Сейсмическая активизация закончилась слабым вулканическим дрожанием. При этом зарегистрировано повышение температуры в одной из вершинных фумарол [Малик, Некрасова, 2020]. Этот факт свидетельствует о незавершившейся извержении инфляции магматического очага и внедрении в постройку субвертикального магматического тела. Как показывает кадр 14.11.2019 г. (рис. 4), этот эпизод совпадает с началом циклического усиления сжатия с экстремумом вблизи г. Толстый мыс и растяжения вблизи кратера вулкана.

Авторы комплексного исследования [Малик, Некрасова, 2020] активности Авачинского вулкана 2013–2020 гг. регистрируют образование трещины и новой фумаролы на вершине, и объясняют это усилением циркуляции флюидов, выделяющихся из-за неглубоко расположенного магматического тела.

Эволюция горизонтальных и вертикальных движений пунктов сети ГНСС представлена на рис. 5. Совокупность кадров рис. 5 демонстрирует приблизительно двухгодичную цикличность вертикальных движений, подобную цикличности деформации дилатации (рис. 4).

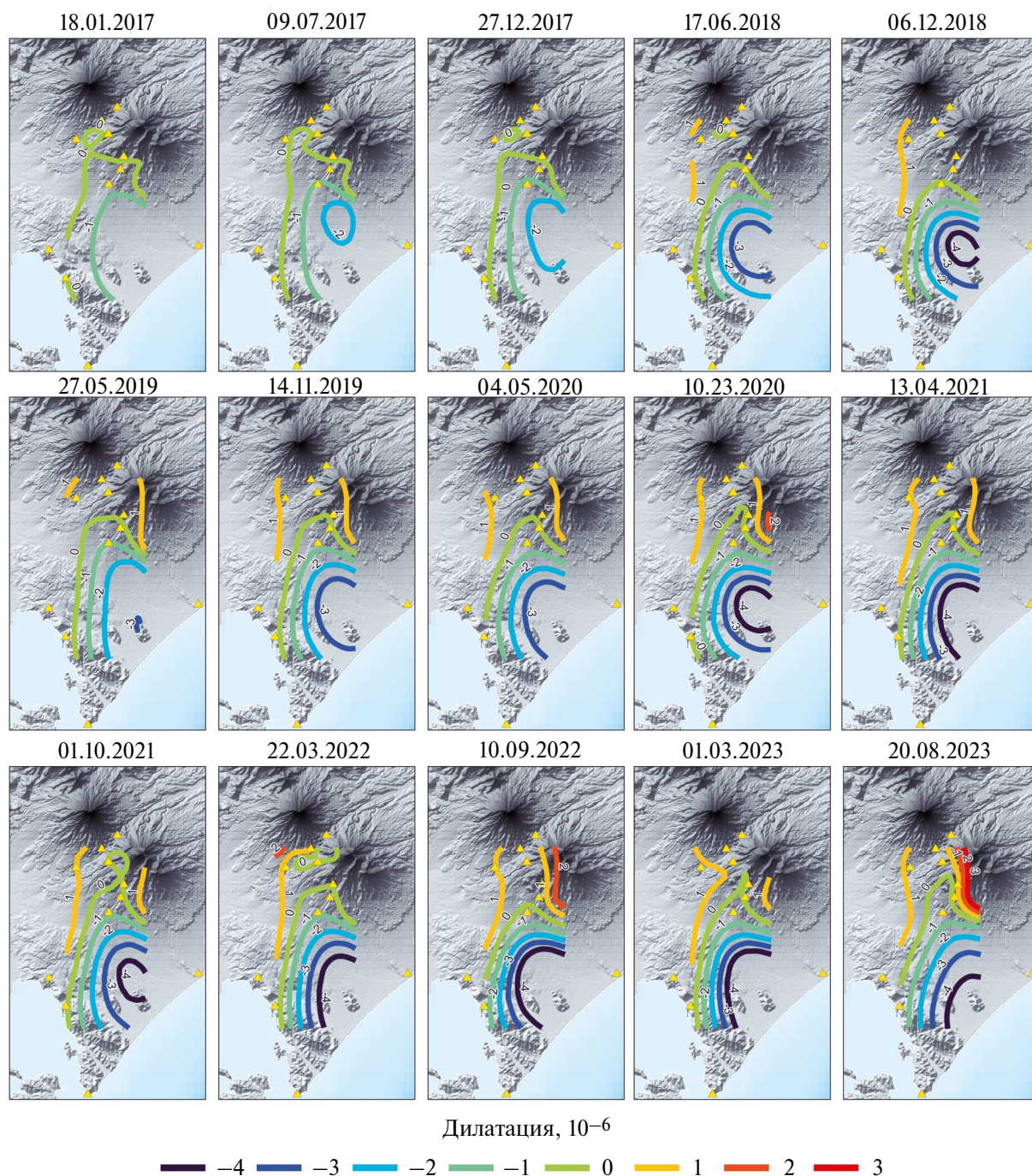


Рис. 4. Изменения дилатации с 2017 по 2023 гг. Точность определения значений составляет $\sim 10^{-7}$.

Это более наглядно демонстрируют графики изменения координат пунктов ГНСС, аналогичные рис. 3. При этом экстремум сжатия близок к экстремуму подъема земной коры в области положительных форм рельефа. Такое поведение можно объяснить горизонтальным давлением со стороны зоны субдукции, обуславливающим рост положительных морфоструктур.

Как показывают исследования [Волкова и др., 2022; Кафтан, 1986; 1991; Кафтан, Родкин, 2018; 2019; 2022; Михайлов и др., 2021; Энман, 1984], деформации активных вулканических построек, полученные по данным классических геодезических наблюдений, а также современных измерительных средств ГНСС и InSAR, во время инфляции магматического очага и внедрения

магмы в подводящий канал наблюдаются поднятия и растяжения вулканического конуса. По завершении извержений деформационный процесс протекает в обратном направлении. Как показано на рис. 4 (последний кадр), в области вершины регистрируется растяжение, не сопровождающееся подъемом (рис. 5), что не дает осно-

ваний предполагать внедрение магмы с глубин к поверхности. Возможно, что это растяжение связано с региональным характером движений бортов глубинной разломной зоны, маркируемой вулканическими конусами Корякского и Авачинского вулканов, а также сопки Козельский. В этой области накоплен слабый сдвиг 5×10^{-7} .

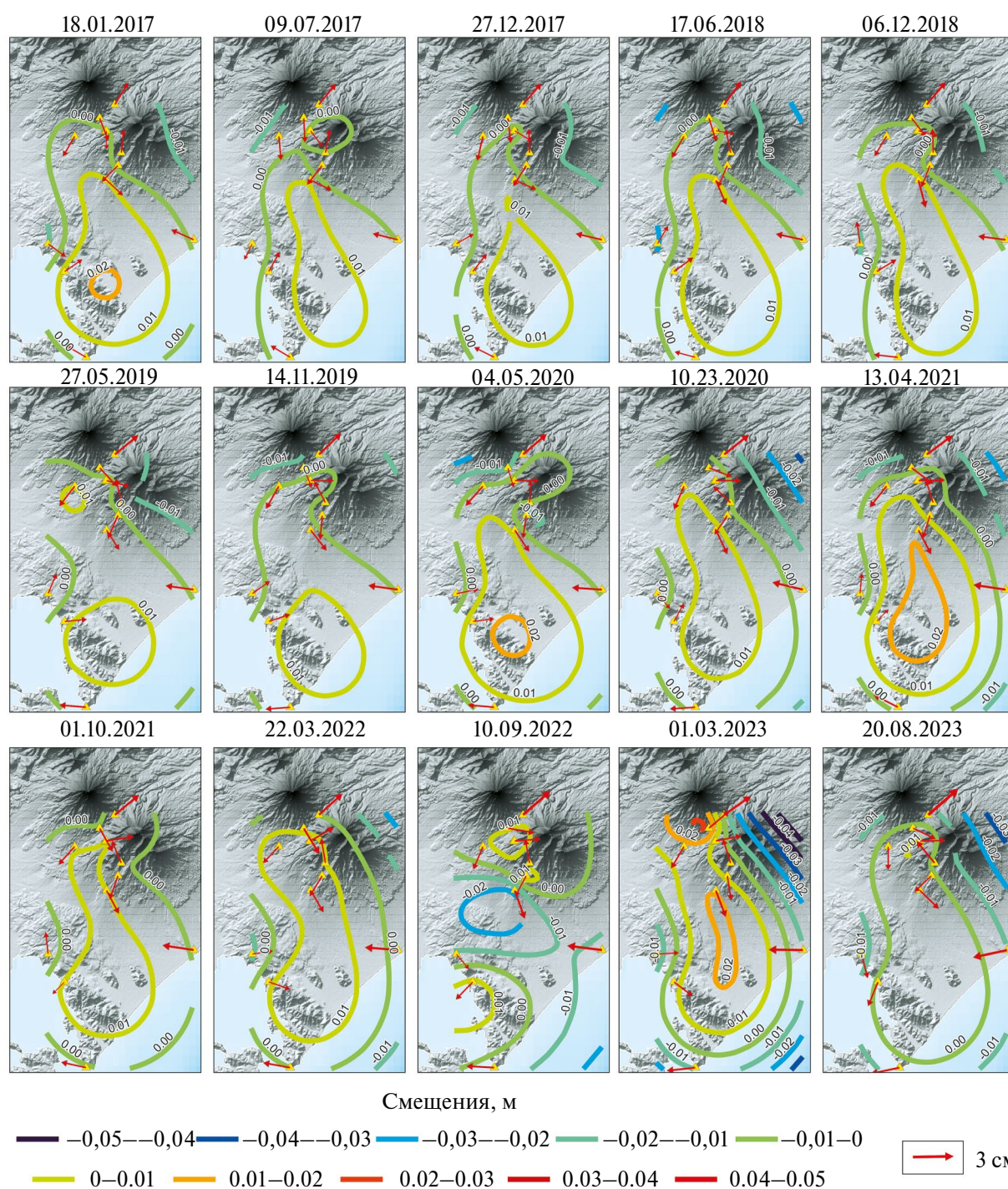


Рис. 5. Векторы горизонтальных и изолинии вертикальных накопленных с 2017 по 2023 гг. смещений земной коры.

Деформация полного сдвига (рис. 6) также демонстрирует примерно двухлетнюю цикличность с постоянным нарастанием. Экстремум деформации зародился в юго-восточной части сети, что может быть объяснено давлением с востока на запад Тихоокеанской плиты на территорию Камчатского полуострова. К концу

периода наблюдений образовался локальный максимум в западной части вулканической постройки Авачинского вулкана.

Ввиду того что в апреле 2023 г. в Авачинском заливе, примерно в 30 км от контрольной сети ГНСС, произошло сильное землетрясение с $M = 6.5$, нами исследована эволюция дефицита

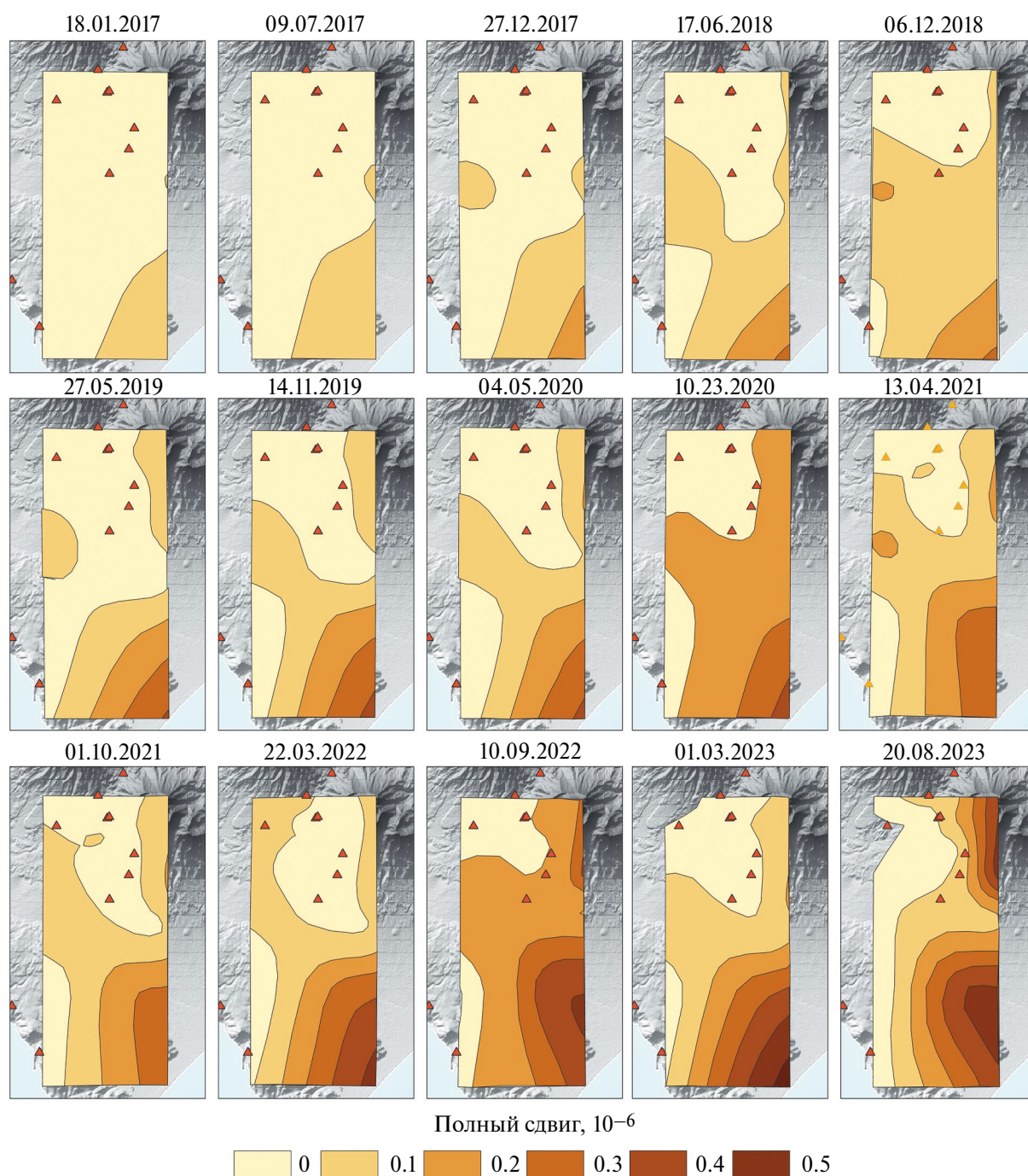


Рис. 6. Изменения накопленной деформации полного сдвига с 2017 по 2023 гг. Точность определения значений составляет $\sim 10^{-7}$.

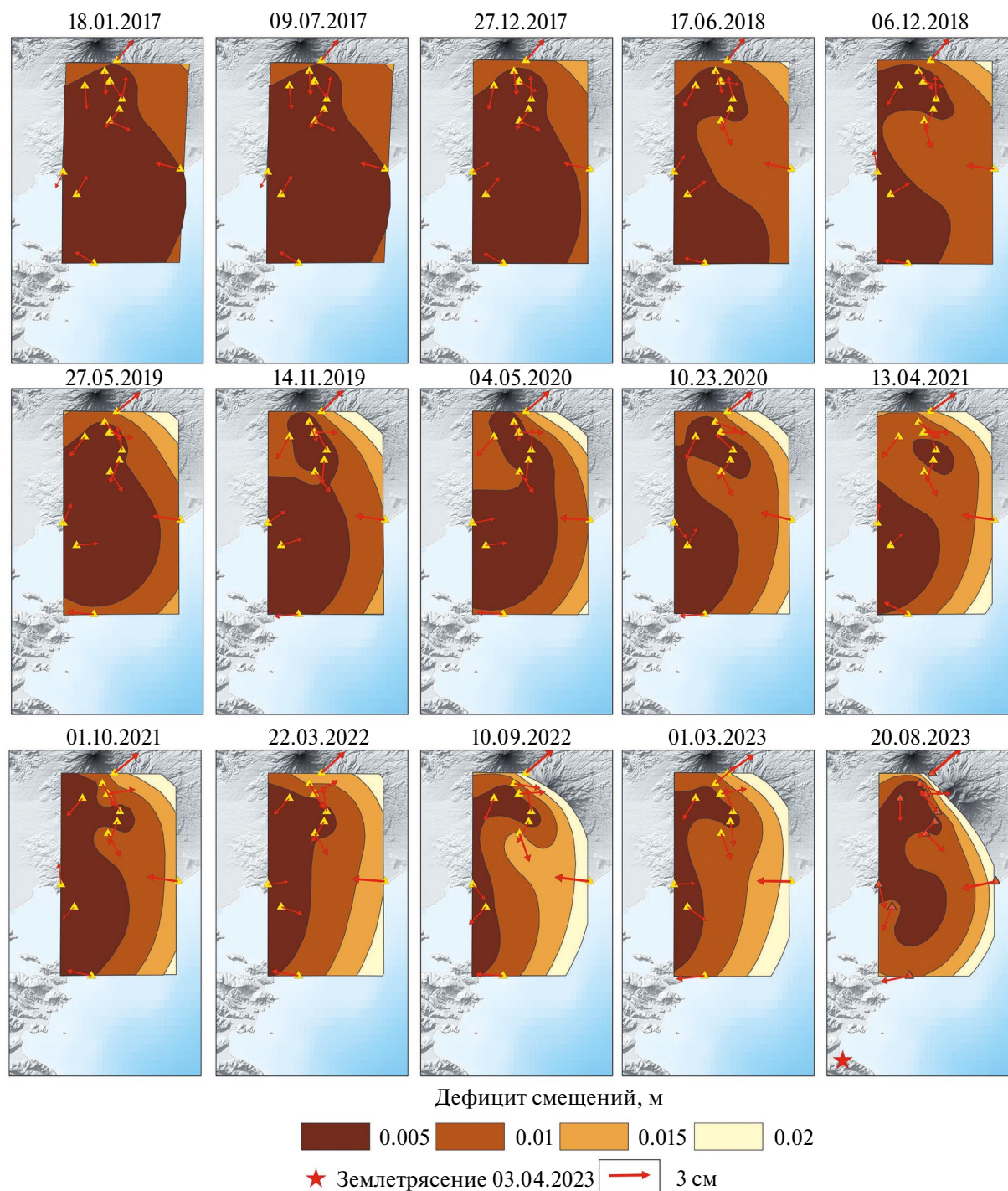


Рис. 7. Изменения накопленного дефицита смещений с 2017 по 2023 гг.

накопленных смещений, что было предложено и использовано ранее в работах [Гвишиани и др., 2022; Кафтан и др., 2021; 2022].

Эти характеристики представляют собой модули векторов накопленных смещений пунктов ГНСС, полученных по формуле:

$$u_j = \sqrt{u_{n_j}^2 + u_{e_j}^2}.$$

Полученное таким образом пространственное распределение внутренних смещений, а именно концентрация их минимальных значений, показывает расположение “запертых” участков

земной коры. Характеристика связывается с зонами повышенных тектонических напряжений и может способствовать поиску мест возникновения землетрясений. К зонам дефицита относятся места минимальных значений u_j , например, не превышающие 2 см, что близко к уровню точности ГНСС-измерений. Пространственно-временная эволюция дефицита смещений показана на рис. 7. Темно-коричневая область показывает именно эту зону, которая со временем концентрируется в запад–юго-западной части исследуемой территории, вблизи которой в апреле 2023 г. произошло сильное землетрясение. Последний кадр рис. 7 продемонстрировал сброс накопленных сейсмо-тектонических напряжений в этой части ГДП, о чем свидетельствует скачкообразное смещение экстремума дефицита смещений на север. Подобный сброс вертикальных движений — сменой подъема опусканием наблюдается на последних кадрах рис. 5. Такая картина типична для многих других изученных сильных сейсмических событий [Гвишиани и др., 2022; Кафтан и др., 2021; 2022]. Полученные результаты вызывают определенный интерес в связи с оценкой сейсмопрогностических возможностей локальной ГНСС-сети Авачинского ГДП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа научных публикаций и исследования движений и деформаций по данным ГНСС-наблюдений в районе Авачинского вулкана можно сделать следующие основные выводы.

1. Сеть регулярных ГНСС-наблюдений исследуемого района позволяет изучать современные движения и деформации вулканической и сеймотектонической природы, но требует расширения на север с целью покрытия всей вулканической постройки.

2. С 2017 по 2023 гг. на изучаемой территории накоплены смещения и деформации, продемонстрировавшие интересные особенности локальной геодинамики района, связанные с процессом субдукции, состоянием Авачинского вулкана и сильным землетрясением в окрестности контрольной сети ГНСС.

3. Горизонтальные движения показывают устойчивый рост перемещения береговой части

территории на запад, что связано с влиянием механизма субдукции. На склоне Авачинского вулкана также наблюдаются относительно ускоренные движения. Оценки вертикальных движений близки к ошибкам их определения. Тем не менее смена накопленного подъема резким опусканием в окрестности горы Толстый мыс демонстрирует косейсмическое движение в связи с землетрясением $M 6.5$.

4. Деформация дилатации в южной части исследуемой территории демонстрирует накопление деформации сжатия, вызванного давлением со стороны оси зоны субдукции. В северной части сети вблизи кратера вулкана накапливается деформация растяжения при отсутствии значимого поднятия. Региональное сжатие с выпиранием коры вверх можно рассматривать как геодезический предвестник сильных землетрясений зон субдукции. Это обстоятельство может быть объяснено горизонтальным движением бортов глубинного разлома, маркируемого вулканическими постройками.

5. Деформация полного сдвига накапливается вблизи побережья Авачинского залива, но в меньшей степени также в районе вулканических построек, подтверждая характер векторного представления горизонтальных смещений пунктов ГНСС.

6. Дефицит внутренних смещений перед землетрясением $M 6.5$ сконцентрировался в юго-западной части. После сейсмического события он разрядился и сместился на север. Очевидно, что сеть ГНСС отреагировала на сильное землетрясение.

7. Все характеристики движений и деформаций земной коры продемонстрировали приблизительно двухлетнюю цикличность. Об устойчивости этого явления можно будет говорить по мере дальнейшего накопления наблюдений. Характер накопления деформаций пока что не дает оснований говорить о возникновении извержения Авачинского вулкана в ближайшие годы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность анонимным рецензентам, тематическому куратору и редакторам журнала за важные замечания по содержанию статьи, учет которых, безуслов-

но, способствовал улучшению четкости и ясности результатов выполненных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России (№ 075-01349-23-00) и темы НИР: Курило-Камчатская островодужная система: активная тектоника, палеосейсмология, современные деформации и геофизические процессы (FWME-2024-0010), утвержденной Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пузанков М.Ю. Потенциальная опасность от извержений Авачинского вулкана. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН. 2001. 428 с.
- Волкова М.С., Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Бабаянц И.П., Дмитриев П.Н., Хайретдинов С.А. Опыт применения спутниковой радарной интерферометрии для изучения вулканических процессов на Камчатке. Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН. 2020. С. 74.
- <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>
- Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Минаев В.А., Устинов С.А., Шевчук Р.В. Геодинамическая модель северной части Нижнеканского массива: разломная тектоника, деформации, изоляционные свойства пород // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 67–74.
- <https://doi.org/10.31857/S2686739722601399>
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Романова И.М., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Маневич А.Г., Крамарева Л.С. Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / О.А. Гирина (отв. ред.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. 192 с.
- Гущенко И.И. Извержение вулканов мира (каталог). М.: Наука. 1979. 476 с.
- Действующие вулканы Камчатки / С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков (ред.). М.: Наука, 1991. Т. 1. 300 с.
- Кафтан В.И. Анализ тригонометрического нивелирования в районе вулкана Толбачик // Геодезия и картография. 1991. № 1. С. 32–36.
- Кафтан В.И. Вопросы определения вертикальных смещений земной коры // Геодезия и картография. 1986. № 10. С. 47–51.
- Кафтан В.И., Кафтан И., Гёк Е. Исследование движений и деформаций земной коры в Восточной Турции в связи с землетрясением Ван (23.10.2011 г., $M_w = 7.2$) с использованием данных GPS-наблюдений // Физика Земли. 2021. № 3. С. 30–44.
- <https://doi.org/10.31857/S0002333721030078>
- Кафтан В.И., Родкин М.В. Деформации земной поверхности в районе вулкана Этна по данным GPS-наблюдений за 2011–2017 гг. — субрегиональные проявления. Труды Международной геолого-геофизической конференции “ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии” [сборник]. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. 2018. С. 183–187.
- Кафтан В.И., Родкин М.В. Деформации района вулкана Этны по данным GPS-измерений, интерпретация, связь с режимом вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 14–24.
- <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019114-24>
- Кафтан В.И., Родкин М.В. Эволюция магматических очагов по данным геодезических наблюдений. Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. Материалы ЛПТ Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС. 2022. С. 200–203.
- Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Долговременные изменения движений и деформаций земной коры до и во время серии землетрясений Кумамото (2016 г., Япония) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 1.
- <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0570>
- Кириенко А.П., Никитенко Ю.П. Особенности горизонтальных и вертикальных деформаций земной поверхности на Петропавловском геодинамическом полигоне (Камчатка) за период 1974–1982 гг. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 38–47.
- Левин В. Е., Бахтияров В. Ф., Титков Н. Н., Сероветников С.С., Магуськин М.А., Ландер А.В. Современные движения земной коры (СЗДК) на Камчатке // Физика Земли. 2014. № 6. С. 17–36. DOI 10.7868/S0002333714060040
- Магуськин М.А., Миронов И.К., Магуськин К.М. О вертикальных движениях земной поверхности в окрестностях вулкана Авачинский в период 1964–1995 гг. и перспективы продолжения этих исследований (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 38–49.
- <https://doi.org/10.7868/S0203030617030038>
- Малик Н.А., Некрасова М.Ю. Комплексные исследования активности Авачинского вулкана в 2013–начале 2020 гг.: наземные, видео и сейсмические наблюдения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Выпуск 46. С. 41–54.
- <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-41-54>
- Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю., Балеста С.Т., Зубин М.И. Вулкан Авачинский / Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 2 / Федотов С.А., Масуренков Ю.П. (отв. ред.). М.: Наука. 1991. С. 244–273.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигалов В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа параметров будущих извержений) Ч. II (1926–1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3–23.

Миронов И.К., Магуськин В.М. Опыт наблюдений за деформациями земной поверхности на малых площадках в разломных зонах в 1984–1995 гг. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 52–68.

<https://doi.org/10.31857/S0203-03062019452-68>

Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шаниро Н.М., Смирнов В.Б. О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3–9.

<https://doi.org/10.31857/S0002333721060041>

Сенюков С.Л., Нужида И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Сейсмичность вулкана Авачинский в 1994–2020 гг. Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным

участием 26 сентября–2 октября 2021 г. г. Петропавловск-Камчатский. С. 221–227.

<https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.41>

Фирстов П.П., Шакирова А.А., Максимов А.П., Черных Е.В. Особенности сейсмической активизации Авачинского вулкана в конце 2019 г. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 497. № 2. С. 165–170.

<https://doi.org/10.31857/S268673972104006X>

Энман С.В. Приповерхностные напряжения и деформации в районе Большого Толбачинского трещинного извержения 1975–1976 гг. на Камчатке. Комплексные геодинамические полигоны. Методика и результаты исследований. М.: Наука. 1984. С. 123–127.

Wu J.C., Tang H.W., Chen Y.Q., Li Y.X. The current strain distribution in the North China Basin of eastern China by least-squares collocation // Journal of Geodynamics. 2006. V. 41. P. 462–470.

<https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.01.003>

Recent Movements and Deformations of the Earth's Crust in the Region of Avacha Volcano (Kamchatka Peninsula) from 2015 to 2023

V. I. Kaftan^{a, *}, I. K. Mironov^{b, **}, A. I. Manevich^{a, c, ***}, R. V. Shevchuk^{a, ****}, and V. M. Maguskin^b

^a*Geophysical Center of the National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

^b*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

^c*National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

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

**e-mail: taliks123@mail.ru

***e-mail: a.manevich@gcras.ru

****e-mail: r.shevchuk@gcras.ru

Received March 5, 2024; revised May 17, 2024; accepted May 19, 2024

Abstract — The results of studies of recent crustal movements and deformations according to GNSS observations in the area of Avacha volcano in 2015–2023 are presented. Studies of Avacha volcano are especially important because it is an active volcano closest to the administrative center of Kamchatka Krai. Interesting features of local geodynamics of the area were revealed. Horizontal and vertical displacements, dilatation and full shear deformations, as well as characteristics of the deficit of “internal” displacements were analyzed. In the southern part of the network there is an accumulation of compression deformation due to pressure from the subduction zone. In the vicinity of the volcano crater, tensile strain accumulates in the absence of significant uplift. The characteristics of the internal displacement deficit show the response of the GNSS network to the M6.5 earthquake (03.04.2023). All changes in the characteristics of crustal motions and deformations demonstrated about two-year cyclicity. In further observations it will be possible to evaluate the stability of this phenomenon. It is also noted the need to expand the network of GNSS observations to the northern slope and foot of Avacha volcano for more detailed geodetic monitoring of its condition.

Keywords: recent crustal movements, deformations, GNSS, volcanism, seismicity, subduction