



ROCK DEFORMATIONS DEDUCED FROM ADIT-BASED MEASUREMENTS ON THE SHIKOTAN ISLAND (LESSER KURIL RIDGE) IN 2024–2025

D.V. Kostylev ^{1,2}, A.S. Zakupin ^{1,2}, N.V. Kostyleva ¹, S.A. Bornyakov ³,
D.V. Salko³, N.S. Stovbun ^{1,2}

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

² Sakhalin Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 2A Tikhookeanskaya St, Yuzhno-Sakhalinsk 693010, Russia

³ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of rock deformation measurements conducted in 2024–2025 on the Shikotan Island (Lesser Kuril Ridge). The measurements were conducted using strainmeters installed in the adit of the former Shikotan geophysical observatory, now the Shikotan seismic station of the Sakhalin Branch of the Geophysical Survey. The research was conducted by means of an instrumental complex developed specially for monitoring rock deformation. The goal of the work is to provide a comprehensive analysis of the variations of deformations of rocks depending on various natural processes.

The first results of the analysis showed the correctness of the employed deformation measurement technique. An important finding was the relationship between deformation rate changes and the local seismic regime. There has been a reaction from both components (alternating impulse) to strong remote earthquakes on July 20 and 30, 2025, in Kamchatka. It was shown that both components of soil deformation consistently reflect the passage of cyclones, which is expressed in short-term variations of an impulsive nature.

KEYWORDS: measurement of rock deformations; strainmeters; seismic regime; earthquakes; impulse variations

FUNDING: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on state assignment (project No. 075-00604-25). The data used in the work were obtained with LSRF "Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world" (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Alexander S. Zakupin, dikii79@mail.ru

Received: September 3, 2025

Revised: September 29, 2025

Accepted: October 14, 2025

FOR CITATION: Kostylev D.V., Zakupin A.S., Kostyleva N.V., Bornyakov S.A., Salko D.V., Stovbun N.S., 2025. Rock Deformations Deduced from Adit-Based Measurements on the Shikotan Island (Lesser Kuril Ridge) in 2024–2025. Geodynamics & Tectonophysics 16 (6), 0865. doi:10.5800/GT-2025-16-6-0865

ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ШТОЛЬНЕ НА о. ШИКОТАН (МАЛАЯ КУРИЛЬСКАЯ ГРЯДА) В 2024–2025 гг.

Д.В. Костылев^{1,2}, А.С. Закупин^{1,2}, Н.В. Костылева¹, С.А. Борняков³,
Д.В. Салко³, Н.С. Стобун^{1,2}

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

² Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 693010, Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2А, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты измерений деформаций горных пород, проводимых в 2024–2025 гг. на о. Шикотан (Малая Курильская гряда). Измерения проводились деформографами, установленными в подземном павильоне (шельне) бывшей Геофизической обсерватории, ныне сейсмической станции «Шикотан» Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Исследования проводились специально разработанным инструментальным комплексом для мониторинга деформаций горных пород. Целью работы является комплексный анализ вариаций деформаций в зависимости от различных природных процессов.

Первые результаты анализа показали корректность используемой методики измерения деформаций. Важным результатом явилась связь изменения скорости деформации с локальным сейсмическим режимом. Выявлена реакция обеих компонент на сильные удаленные землетрясения (знакопеременный импульс) 20 и 30 июля 2025 г. на Камчатке. Показано, что обе компоненты деформации грунта согласованно отражают прохождение циклонов, что выражается кратковременными вариациями импульсного характера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: измерение деформации горных пород; деформографы; сейсмический режим; землетрясения; импульсные вариации

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания (проект № 075-00604-25) с использованием данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых сейсмически активных регионов России является Сахалинская область, и в частности Курильские острова, которые входят в состав тихоокеанского сейсмического пояса и характеризуются большой контрастностью и интенсивностью тектонических движений, высоким уровнем сейсмичности и активным вулканализмом.

При сейсморайонировании Курильских островов выделяют Большую и Малую Курильскую гряду, отличающиеся как геологическим развитием, так и положением фокальной зоны. Большая Курильская гряда разделяется на Северо-Курильский, Среднекурильский и Южно-Курильский районы, которые, в свою очередь, различаются по тектоническим особенностям и геофизическим характеристикам [Tarakanov et al., 1976]. В пределах южной части Курильского региона выделяется основная наклонная фокальная зона, верхняя кромка которой выходит на дневную поверхность в районе Малой Курильской гряды и хребта Витязь.

Остров Шикотан является самым крупным островом Малой Курильской гряды и представляет собой выступающий над водой участок невулканической дуги. На северо-восток Малая Курильская гряда продолжается в виде подводного хребта Витязь, а на юго-западе переходит в зону складок п-ова Немуро на о. Хоккайдо [Kugaenko et al., 2008].

Материковый склон Курильского глубоководного желоба и, в особенности, его юго-западная часть, прилегающая к Южным Курильским островам, относятся к числу наиболее сейсмоактивных районов в мире. Начиная с 1900 г. [Andreeva, Kim, 2012] здесь произошло более 130 сильных землетрясений с магнитудой Ms не менее 6.5, т.е. средняя частота сильных событий превышает один случай в год. За этот же период отмечено 11 катастрофических землетрясений с магнитудой M≥7.8, средний интервал между такими событиями составляет около 10 лет.

Наиболее сильным сейсмическим событием в районе о. Шикотан стало землетрясение 4 (5) октября 1994 г. (моментная магнитуда Mw=8.3), которое привело к значительным разрушениям зданий и сооружений на островах Шикотан, Кунашир, Итуруп и гибели людей. Данное землетрясение относится к числу сильнейших в прошлом столетии. Главный толчок вызвал волны цунами значительной высоты [Tikhonov, Shevchenko, 2015]. Помимо значительных разрушений, это землетрясение имело необычный характер косейсмических дислокаций, остров Шикотан погрузился в море как единое целое примерно на 0.6 м, при этом на многих участках его территории образовались разрывы, оползни и обвалы. Координаты главного толчка землетрясения 4 (5) октября 1994 г. – 43.5° с.ш. 147.3° в.д. Интенсивность колебаний грунта на о. Шикотан составила 8–9,

на о. Кунашир – 7–8 и на о. Итуруп – 6–7 баллов. Сотрясения сопровождались оглушительным подземным гулом, свечением неба, вызвали обширные нарушения и деформации в грунтах, разрушения и повреждения зданий, промышленных и военных объектов, мостов, дорог, причалов, коммуникаций. Повреждено более 100 зданий, погибли 11 человек, серьезно ранены 32, легко ранены 210.

Очевидно, что такая высокая сейсмическая активность и ее проявления являются крайне ценным источником информации для решения таких ключевых задач сейсмологии на Дальнем Востоке РФ, как изучение внутреннего строения Земли с помощью сейсмических волн, определение причин возникновения землетрясений, а также их прогнозирование для минимизации последствий. Решение перечисленных задач невозможно без проведения непрерывного мониторинга сейсмичности и геофизических процессов. Регистрация сейсмичности уже давно представляет собой непрерывный процесс, который обеспечивает Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН), и является ее приоритетом. В остальных же случаях (другие геофизические измерения) имеет место энтузиазм отдельных научных групп (даже не организаций), который позволяет в течение некоторого времени проводить непрерывные измерения того или иного геофизического параметра. Данная работа посвящена измерениям деформаций горных пород по авторскому методу С.А. Борнякова и

Д.В. Салко [Salko, Bornyakov, 2014] на о. Шикотан и комплексному анализу их вариаций в зависимости от различных природных процессов.

2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА о. ШИКОТАН

Первая сейсмическая станция на о. Шикотан была открыта в с. Малокурильском Институтом физики Земли (ИФЗ) АН СССР еще в ноябре 1958 г. и оборудована сейсмографом ВЭГИК, нашедшим широкое применение в СССР для решения различных задач инженерной сейсмологии, а также при регистрации землетрясений и микросейсм [Kirkos, Kharin, 1958]. В дальнейшем (1962 г.) в с. Малокурильском была организована стационарная сейсмическая станция, вошедшая в Единую систему сейсмологических наблюдений СССР [Starovoit, Mishatkin, 2001].

Важным шагом в развитии систем геофизического мониторинга на Южных Курилах стало создание на о. Шикотан в конце 1965 г. Геофизической обсерватории (ГФО) (рис. 1) со станциями стационарных наблюдений [Bogomolov et al., 2021]. В 1965 г. в составе обсерватории действовало 11 подразделений, включая и станцию, оснащенную комплектами региональной аппаратуры на о. Шикотан. Для размещения оборудования станции в 1965 г. был введен в эксплуатацию подземный павильон (штольня), расположенный на отметке 35 м над уровнем моря в сопке высотой 57 м и пройденный без применения взрывных технологий,

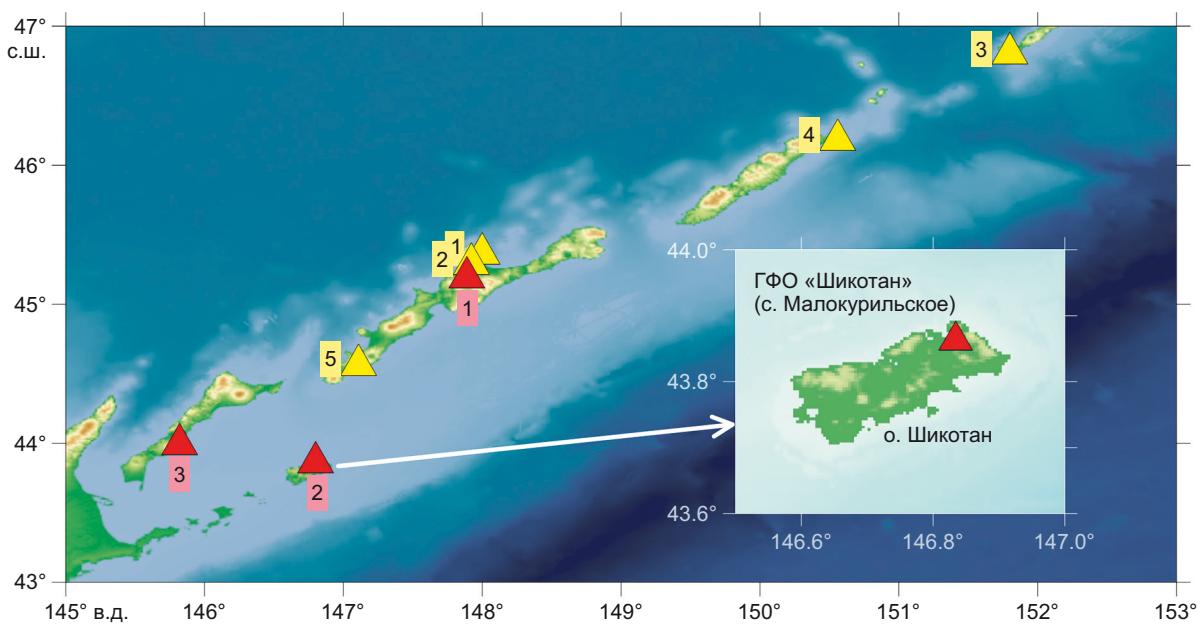


Рис. 1. Сейсмические станции на Южных и Средних Курильских островах в 1960-х гг. Красные треугольники (действующие станции): 1 – Курильск (с 1950 г.), 2 – Малокурильское (с 1958 г.), 3 – Южно-Курильск (с 1960 г.). Желтые треугольники (закрытые станции): 1 – Рейдово (1958–1987 гг.), 2 – Китовый (1959–1965 гг.), 3 – Симушир (1960–1993 гг.), 4 – Уруп (1967–1976 гг.), 5 – Ясный (1967–1968 гг.). На врезке – о. Шикотан и расположение ГФО.

Fig. 1. Seismic stations on the Southern and Middle Kuriles in the 1960s.

Red triangles (stations in operation): 1 – Kurilsk (since 1950), 2 – Malokurilskoye (since 1958), 3 – Yuzhno-Kurilsk (since 1960). Yellow triangles (stations out of operation): 1 – Reydovo (1958–1987), 2 – Kitovsky (1959–1965), 3 – Simushir (1960–1993), 4 – Urup (1967–1976), 5 – Yasny (1967–1968). The inset shows the Shikotan Island and the location of the Shikotan geophysical observatory.

что обеспечило сохранность естественной структуры вмещающего массива горных пород. Оборудование располагалось в двух взаимно перпендикулярных выработках длиной 25 м, закрепленных бетоном и перекрытых слоем породы 15–20 м [Object..., 1964]. Сооружение штольни перевело сейсмостанцию «Шикотан» в ряд лучших наблюдательных обсерваторий Дальнего Востока. Здесь, кроме сейсмографов с большим увеличением, впервые на Дальнем Востоке установлены приборы для изучения наклонов и деформаций земной поверхности. Для деформографов в противоположных концах камер были установлены фундаменты размером 1×1 м. На одном из них деформограф крепился жестко, а на другом лежал на подвесках. В промежутке между основными фундаментами (через каждые 3 м) были установлены промежуточные размером 0.4×0.4 м.

Постоянная регистрация сейсмических явлений, наклонов и деформаций земной коры на ГФО «Шикотан» была начата в 1967 г. Регистрация велась с помощью наклонометров системы А.Е. Островского [Ostrovsky, 1961] и кварцевого деформографа [Quartz Strainmeter, 1981]. При этом до 1976 г. обработка записей наклонометров и деформографов практически не проводилась, за исключением работ [Pustovitenko et al., 1971] в период наблюдений 1967–1968 гг. В указанной статье авторами были получены интересные результаты, выразившиеся в резком изменении хода наклонов примерно за два месяца перед цунамигенным землетрясением 11 августа 1969 г. (M=8.25 и интенсивность 7–8 баллов в с. Малокурильском) и за один месяц перед землетрясением 27 февраля 1970 г. (которое ощущалось в с. Малокурильском с силой около 5 баллов). Величина изменения наклона по составляющей север – юг перед рассмотренными землетрясениями достигала 2.5". Отмечалось, что во всех упомянутых случаях направление хода наклонов после землетрясения не менялось в течение довольно длительного времени – от одного до трех месяцев. Было сделано предположение, что крылья разлома после высвобождения энергии, выразившегося в землетрясении, продолжают по инерции движение в том же направлении, что и до землетрясения. С 1976 г. в Сахалинском комплексном научно-исследовательском институте (СахКНИИ) проводилась машинная обработка записей с целью выявления закономерностей и связей местной сейсмичности с реги-

онами аномалиями в наклонах и деформациях земной коры [Vyalykh, Naumenko, 1978]. В исследованиях отмечалось, что малые петлеобразные изменения хода наклона вызваны слабыми коровыми землетрясениями, в то время как такие же и более сильные землетрясения с глубиной гипоцентров от 40 км не оказывают влияния на ход наклона. К сожалению, авторам не удалось найти информацию о результатах наблюдений деформационных процессов на ГФО «Шикотан» за 1980-е гг., а в 1995 г., в связи с отсутствием необходимого финансирования и после разрушительного Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г., когда наземные сооружения ГФО «Шикотан» получили значительные повреждения, сейсмическая станция «Шикотан» была «законсервирована», а с 1 января 1997 г. официально закрыта.

К возобновлению сейсмических наблюдений на о. Шикотан удалось вернуться только в конце 2009 г., когда в рамках федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2010 года» [On the Federal Target Program..., 2006] в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН (СФ ФИЦ ЕГС РАН) была создана сейсмическая подсистема Службы предупреждения цунами (СП СПЦ), одной из опорных станций которой стала сейсмическая станция «Шикотан» [Chebrov et al., 2012], оснащенная передовым цифровым регистрирующим оборудованием и широкополосным сейсмометром [Mishatkin et al., 2011], размещенными в штольне.

Деформационные наблюдения были возобновлены в октябре 2014 г., когда в рамках договора между Институтом земной коры Сибирского отделения РАН (ИЗК СО РАН) и СФ ФИЦ ЕГС РАН в штольне было установлено и введено в эксплуатацию оборудование деформационного мониторинга.

Мониторинг осуществляется инструментальным комплексом (ИК) собственной разработки [Salko, Boronyakov, 2014]. На рис. 2 приведена его принципиальная блок-схема. Он включает в себя прибор сбора и передачи данных (ПСПД), аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), аналоговые датчики, систему автономного питания, базовый сервер, а также серверную и клиентскую программы управления.

Основное назначение ИК – измерение и точная привязка во времени показаний с датчиков разного типа,



Рис. 2. Блок-схема инструментального комплекса для мониторинга деформаций горных пород.

Fig. 2. Block diagram of the instrumental complex for monitoring rock deformations.

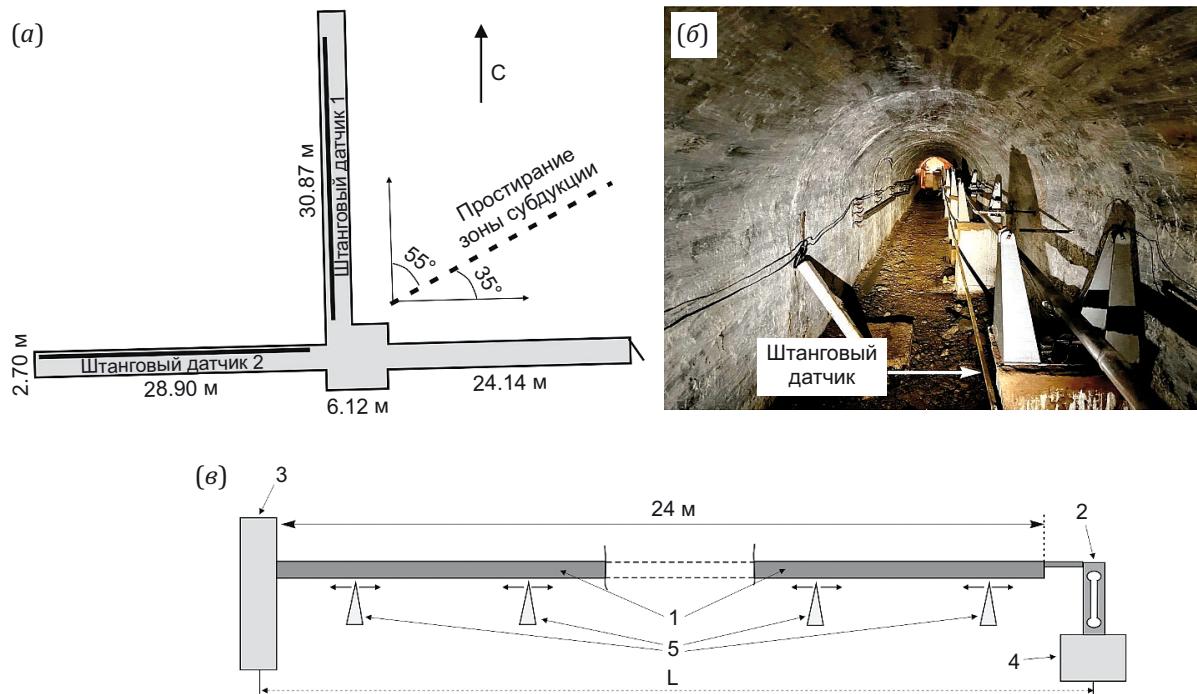


Рис. 3. Контурная схема штольни (а), внешний вид одного из ее рабочих ходов (б) и устройство размещенных в ней штанговых датчиков (в).

Fig. 3. Contour diagram of the adit (a), external view of one of its working passages (b), and structure of the rod sensors placed therein (c).

запись их во флэш-память с последующей передачей в режиме on-line по системе сотовой связи на удаленный базовый сервер. В ПСПД использована шина RS485, позволяющая одновременно подключить до 32 АЦП. Количество используемых датчиков определяется количеством каналов АЦП. При одно- и двухканальном исполнении к ним может быть подключено 32 или 64 датчика соответственно. В качестве измерительного элемента используются тензодатчики балочного типа, тарированные на линейные деформации. Аналоговый сигнал с датчиков преобразуется АЦП в цифровой код с дискретностью 8 Гц в течение 10 с, из накопленных 80 значений берут среднее и отправляют эту цифру на ПСПД с последующей передачей в базу данных на сервер в ИЗК СО РАН. Таким образом, дискретность данных формируемого временного ряда составляет 10 с.

ИК размещен в описанном выше подземном павильоне (штольня) в двух взаимно перпендикулярных выработках, ориентированных под углами 35 и 55° к простирианию зоны субдукции (рис. 3, а, б). В каждом из них установлены штанговые датчики ИК. Такой датчик состоит из штанги 1 длиной 24 м, изготовленной из квадратных металлических труб 25×25 мм, и аналогового тензодатчика 2 (рис. 3, в). Один конец штанги закреплен неподвижно на бетонной тумбе 3, другой соединен с тензодатчиком, жестко скрепленным с бетонной тумбой 4 (рис. 3, в). Подвижные опоры 5 обеспечивают свободное перемещение штанги, но при этом исключают ее деформационный изгиб (рис. 3, в). Штанговые датчики установлены на бетонных тум-

бах, отстоящих друг от друга на расстоянии 3 м и являющихся конструктивным элементом ныне не действующего наклономера (рис. 3, б).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения деформаций (компонент перемещений в направлениях север – юг (u1) и восток – запад (u2)) в штольне на о. Шикотан проводятся с 15 октября 2024 г. по настоящее время (в работе использованы данные по 12 августа 2025 г.). На рис. 4 показаны графики деформаций для обеих компонент.

В полученных данных четко выделяется 12-часовая приливная компонента, которую наиболее наглядно можно наблюдать на рис. 5 из записи поперечной компоненты.

Качественные записи приливов в поперечной компоненте обусловлены в целом высокой чувствительностью (см. рис. 4, б), что может затруднять выделение трендов и способствовать пропуску важных событий, поэтому начинать анализ целесообразнее с изменений в продольной компоненте, а поперечная будет рассматриваться параллельно.

На графике продольной компоненты (см. рис. 4, а) первоначально выделяется довольно динамичное вступление с резким ростом смещения, однако затем происходит стабилизация графика, в результате чего скорость становится постоянной. Далее можно выделить несколько участков, на которых наблюдается постоянная скорость, а также отметить наличие шести импульсных вариаций, которые имеют схожую динамику.

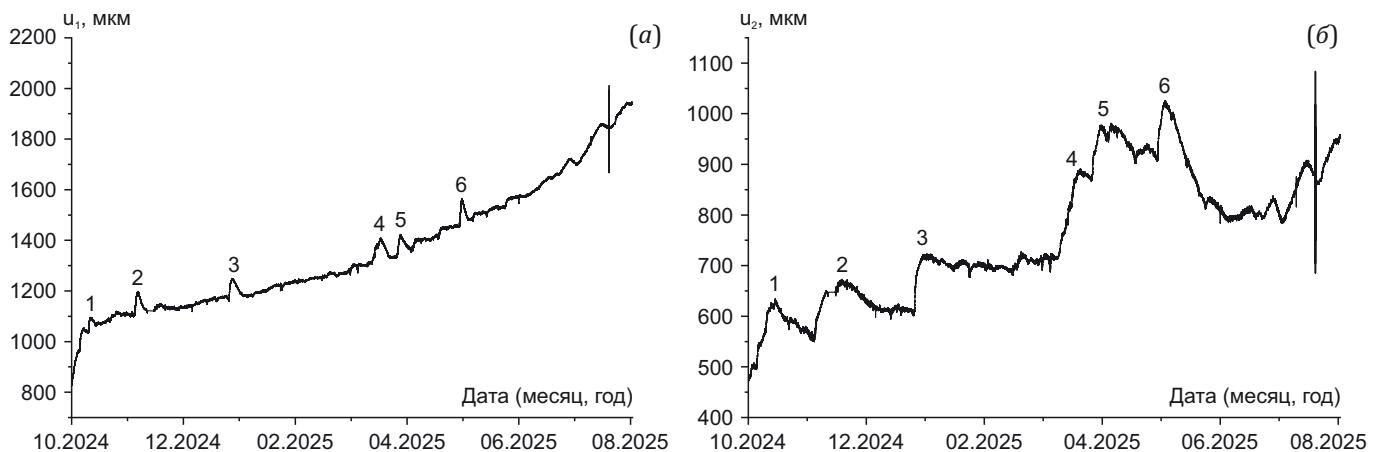


Рис. 4. Обобщенный график деформаций с 15.10.2024 г. по 12.08.2025 г. в направлениях север – юг (а) и восток – запад (б). Цифрами показаны импульсные вариации деформаций.

Fig. 4. Generalized schedule of deformations October 15, 2024 to August 12, 2025, directed north – south (a) and east – west (b). The numbers show impulse variations of deformations.

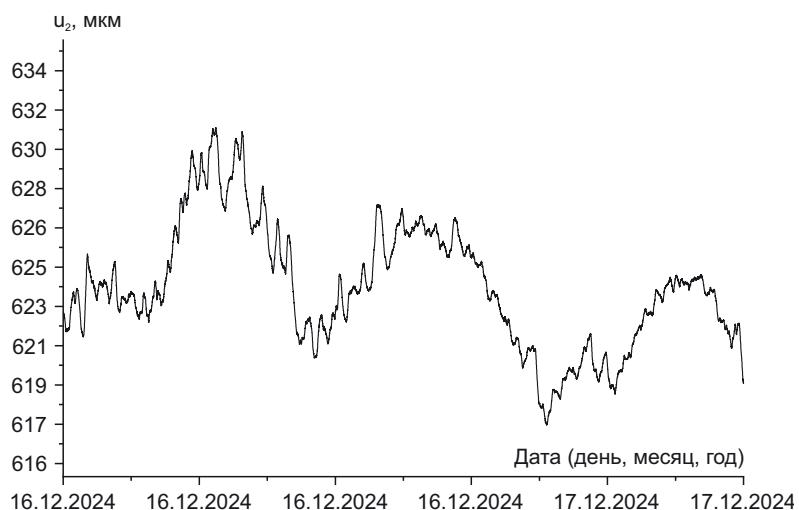


Рис. 5. 12-часовые вариации перемещений, обусловленных лунно-солнечными приливами.

Fig. 5. 12-hour variations in displacements caused by lunisolar tides.

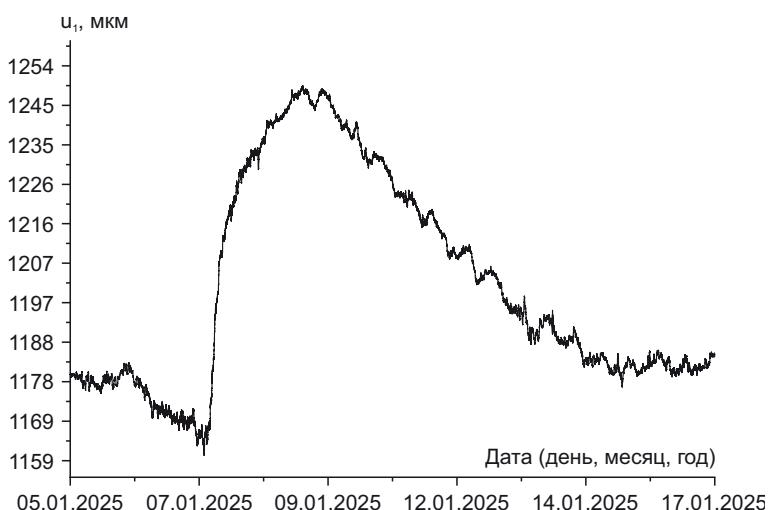


Рис. 6. Импульсная модуляция вариаций деформации за период 05.01.2025–17.01.2025 г.

Fig. 6. Pulse modulation of deformation variations for the period January 5–17, 2025.

На примере импульсной модуляции вариаций деформации за период с 05.01.2025 по 17.01.2025 г., представленной на [рис. 6](#), в первую очередь выделяется резкий рост графика, а затем наступает плавное снижение. По времени импульсные вариации присутствуют и на поперечной компоненте, но выглядят иначе, с очень высокой амплитудой, а также длительным затуханием, и фактически перегружают весь график, что подтверждает меньшую информативность поперечной компоненты.

Для объяснения природы импульсных вариаций и уточнения возможной корреляции с воздействием ат-

мосферных факторов дополнительно были использованы синоптические обзоры (например [Mezentseva, Kaptuyg, 2024]), содержащие информацию о положении циклонов в периоды импульсных вариаций по данным гидрометеорологических бюллетеней Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института (ДВНИГМИ). Карта прохождения циклонов в периоды импульсных вариаций показана на [рис. 7](#), а в [табл. 1](#) приведены данные о связи вариаций и циклонов в указанные даты.

Как видно из [рис. 7](#) и [табл. 1](#), наблюдается максимальное совпадение в датах импульсных вариаций и

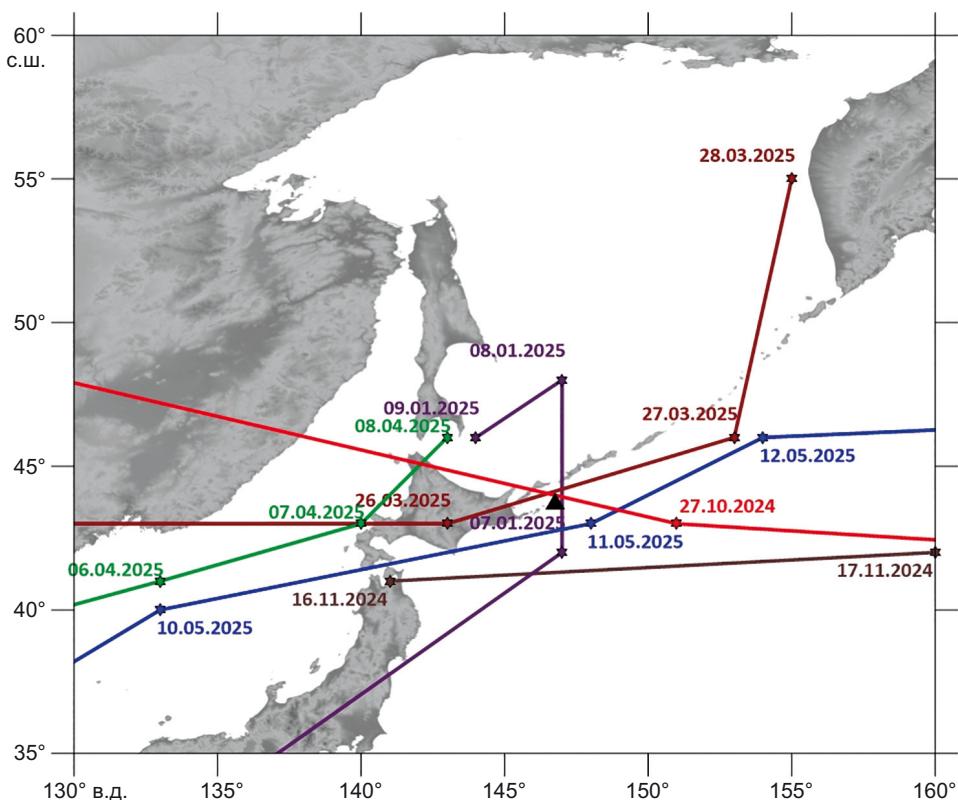


Рис. 7. Карта прохождения циклонов в периоды импульсных вариаций (черный треугольник – положение пункта деформационного мониторинга).

Fig. 7. Map of the tracks of cyclones which formed during periods of pulse variations (black triangle is the position of the deformation monitoring point).

Таблица 1. Данные о связи импульсных вариаций и циклонов, показанных на [рис. 7](#)

Table 1. Data on the relationship between pulse variations and cyclones shown in [Fig. 7](#)

№	Начало импульсной вариации	Максимум импульсной вариации	Окончание импульсной вариации	Минимальное расстояние от пункта мониторинга до трассы прохождения циклона (даты прохождения циклона)
1	24.10.2024 г.	25.10.2024 г.	28.10.2024 г.	20 км (26.10–27.10)
2	17.11.2024 г.	19.11.2024 г.	24.11.2024 г.	270 км (16.11–17.11)
3	07.01.2025 г.	09.01.2025 г.	14.01.2025 г.	0 км (7.01–8.01)
4	25.03.2025 г.	29.03.2025 г.	03.04.2025 г.	30 км (26.03–27.03)
5	06.04.2025 г.	09.04.2025 г.	14.04.2025 г.	470 км (7.04–8.04)
6	10.05.2025 г.	12.05.2025 г.	16.05.2025 г.	110 км (10.05–11.05)

прохождения циклонов вблизи пункта деформационных наблюдений. Известно, что барические вариации в атмосфере, вызываемые циклонами [Adushkin et al., 2008], оказывают сильное влияние на сейсмический шум, а ранние [Vyalikh, Naumenko, 1978] исследования деформационных процессов в штолне ГФО «Шикотан» показали, что проходящие циклоны могут оказывать существенное воздействие на земную кору, вызывая в ней заметные деформации, что, по-видимому, и объясняет наблюдаемые импульсные вариации на рис. 4.

Для дальнейшего исследования была проведена линейная аппроксимация по методу Linear Fit [OriginPro, 2021] для продольной компоненты. По ее результатам выделены три участка с наилучшими параметрами. Выделенные участки визуально могут быть разделены по скорости перемещения, на рис. 8 они отмечены красными линиями. Каждый последующий участок имеет скорость, в два раза превосходящую скорость предыдущего периода (рис. 8).

Для наглядности укажем также характерные точки – смены скорости хода (переход к новому аппроксимированному участку) и продублируем их на графике поперечной компоненты (рис. 8, б).

После разделения участков с разными скоростями в период до 09.07.2025 г. появились два маркера – 22.03.2025 и 19.06.2025 г. Для анализа возможных причин подобных изменений рассмотрена сейсмичность района Южных и Средних Курил в период деформационных наблюдений. По данным информационной системы СФ ФИЦ ЕГС РАН [Shchukin, Kostylev, 2021] за период с 15.10.2024 г. по 12.08.2025 г. в исследуемом районе произошло 350 землетрясений с $M_L \geq 3.5$ до $M_L = 6.3$, из них 22 имели инструментальную интенсивность выше 3.6 балла по шкале ШСИ-17 [GOST..., 2017] (рис. 9). Информация об ощущимых землетрясениях и их интенсивности (табл. 2) получена на основании пиковых ускорений грунта на станциях инженерно-сейсмометрического мониторинга, установленных СФ

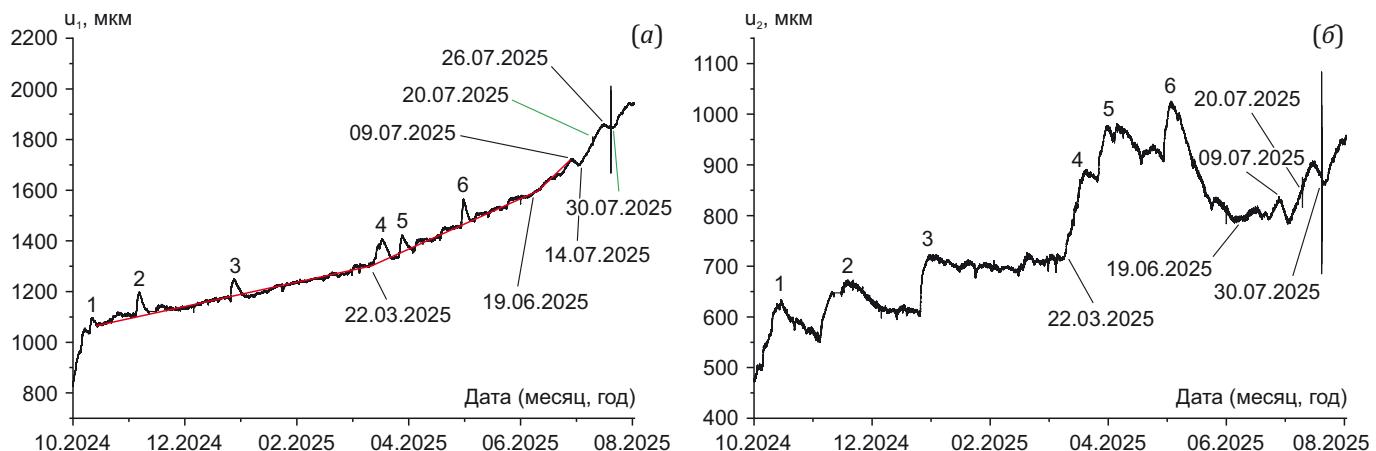


Рис. 8. Изменение перемещений в направлениях север – юг (u_1) и восток – запад (u_2). Датами указаны маркеры разделения участков с разными скоростями деформации.

Fig. 8. Changes in north – south (u_1) and east – west (u_2) movements. The dates indicate markers separating the sections with different deformation rates.

Таблица 2. Список ощущимых землетрясений ($I \geq 3.6$) в с. Малокурильском за период 15.10.2024 г. – 12.08.2025 г.

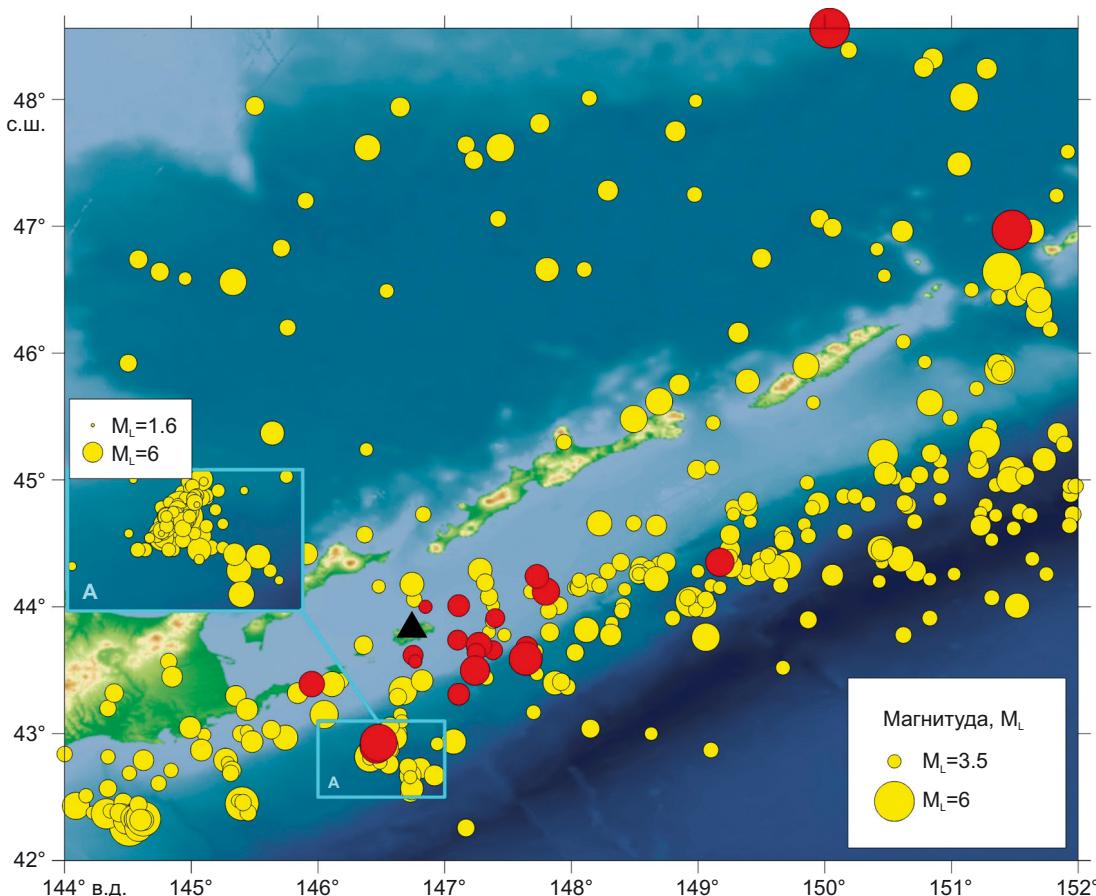
Table 2. List of felt earthquakes ($I \geq 3.6$) in the village of Malokurilskoye for the period October 15, 2024 – August 12, 2025

№	Дата	Долгота	Широта	Глубина	M_L	I	Δ , км
1	2024.10.30	147.11	43.31	44	4.4	3.6	74
2	2024.12.05	147.38	43.66	38	4.1	3.9	43
3	2024.12.09	147.8	44.12	84	5.0	5.2	70
4	2024.12.27	151.48	46.97	182	6.3	4.7	509
5	2025.01.13	147.10	43.74	75	4.2	4.0	21
6	2025.02.16	147.40	43.91	46	4.1	4.9	35
7	2025.02.18	147.27	43.70	42	4.8	5.3	34
8	2025.02.20	147.25	43.64	40	4.0	4.0	37
9	2025.03.05	147.65	43.68	85	4.4	4.7	60

Таблица 2 (продолжение)

Table 2 (continued)

№	Дата	Долгота	Широта	Глубина	M_L	I	Δ , км
10	2025.03.13	146.75	43.62	72	4.2	4.2	36
11	2025.03.14	146.77	43.57	62	3.5	3.7	41
12	2025.04.13	150.04	48.56	399	6.3	4.0	580
13	2025.04.15	147.66	43.55	57	4.3	3.9	68
14	2025.05.29	147.64	43.59	36	5.6	6.7	65
15	2025.06.18	146.46	42.90	55	5.6	4.9	120
16	2025.06.21	146.48	42.93	45	6.0	4.5	115
17	2025.06.27	146.85	44.00	63	3.5	3.9	14
18	2025.07.06	147.24	43.50	41	5.2	5.4	50
19	2025.07.24	147.73	44.24	59	4.6	3.8	70
20	2025.07.29	147.11	44.01	85	4.4	4.2	15
21	2025.07.30	149.17	44.35	61	5.1	3.9	195
22	2025.08.01	145.95	43.39	68	4.8	4.1	89

Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений с $M_L \geq 3.5$ в период 15.10.2024 г. – 12.08.2025 г.

Красный цвет – землетрясения с $I \geq 3.6$ по шкале ШСИ-17 в с. Малокурильском. Чёрный треугольник – пункт деформационного мониторинга.

Fig. 9. Map of $M_L \geq 3.5$ earthquake epicenters for the period October 15, 2024 – August 12, 2025.

Red color shows the earthquakes with $I \geq 3.6$ on the SIS-17 scale in the village of Malokurilskoye. The black triangle is the deformation monitoring point.

ФИЦ ЕГС РАН в жилых зданиях в с. Малокурильском [Kostylev, Kostyleva, 2024].

В работе [Vyalykh, Naumenko, 1978], как уже было сказано выше, отмечалось, что изменения хода наклона сопровождаются слабыми коровыми землетрясениями, происходящими в ближней от пункта мониторинга зоне. Можно предположить, что парные ощущимые события 13–14 марта 2025 г. (табл. 2, номера 10 и 11) могли оказать влияние на изменение хода деформации, произошедшее 22 марта 2025 г. Данные события минимально (около 40 км) удалены от пункта мониторинга (рис. 9, два красных эпицентра к югу под черным треугольником).

Более интересным и очевидным представляется изменение скорости деформации, произошедшее 19.06.2025 г. В период с 18.06.2025 г. по 28.06.2025 г. на сравнительно небольшом участке (146–147° в.д. и 42.5–43.1° с.ш.) произошло 109 землетрясений с M_L от 1.6 до 6.0 (табл. 2, № 15, 16 – два ощущимых). Данный участок, как и участок с эпицентрами землетрясений, произошедших 14 марта, находится к югу от пункта мониторинга (рис. 9, а), а именно это направление от пункта отмечалось и в работе [Pustovitenko et al., 1971] как оказывающее влияние на регистрируемые деформационные процессы.

После второй точки смены тренда (19.06.2025 г.) наблюдается регуляризация, дисперсия уменьшается, а скорость начинает резко возрастать. При этом 28 июня не только происходит прекращение указанной выше активизации, но также наблюдается замедление деформации. Рассмотрим этот участок в масштабе (рис. 10).

После 28.06.2025 г. хорошо прослеживаются очевидные моменты изменения тренда (с резкими замедлениями и ростом): 9 июля, 14 июля, 20 июля, 26 и 30 июля, на которых четко выделяются два схожих

отклонения в росте графика, назовем их «аномалии», отмеченные на рис. 10 красными овалами.

Предположительно, обе «аномалии» связаны с ключевыми сейсмическими событиями, произошедшими в июле 2025 г. к востоку от п-ова Камчатка. Коснемся каждой «аномалии» более детально. На первой видно, что рост деформации, начавшийся 28 июня, выходит на максимальный пик 9 июля, затем происходит достаточно резкое «торможение» до 14 июля, после чего рост деформации выходит на максимальную скорость (почти вертикально) и замедляется (рис. 10, отрезок с 20 по 26 июля). В период этой «аномалии» происходит сейсмическое событие 20.07.2025 г. ($Ms=7.6$). Событие 20 июля у побережья Камчатки было комплексным; по сути, это серия землетрясений, в которой самое сильное произошло в 06:49 UTC (в эпицентре катастрофическое по шкале ШСИ-17) с $M=7.6$ [Activation..., 2025]. Развитие процесса фиксируется с первого сейсмического события в 06:02 UTC с $M=5.3$, далее в 06:28 UTC с $M=6.9$. Всего на фоне более слабых событий произошло еще пять землетрясений с магнитудой $M>6$ в течение 40 мин после первого толчка.

В период второй «аномалии» (подобно вышеописанному росту деформации для первой «аномалии» на отрезке графика с 28 июня по 20 июля на рис. 10) начиная с 20 июля рост деформации снова увеличивается до 26 июля, после чего начинается резкое замедление скорости деформации, достигая своего самого низкого значения 30 июля, когда у юго-восточного побережья п-ова Камчатка происходит сильнейшее цунамигенное землетрясение с магнитудой $Ms=8.2$ [Strong Earthquake..., 2025].

Согласно рис. 8, а, и 09.07.2025 г., и 26.07.2025 г. на графике четко выделяются импульсы значительной амплитуды, что согласуется с графиком поперечной компоненты (см. рис. 8, б). Оба эти импульса значительной

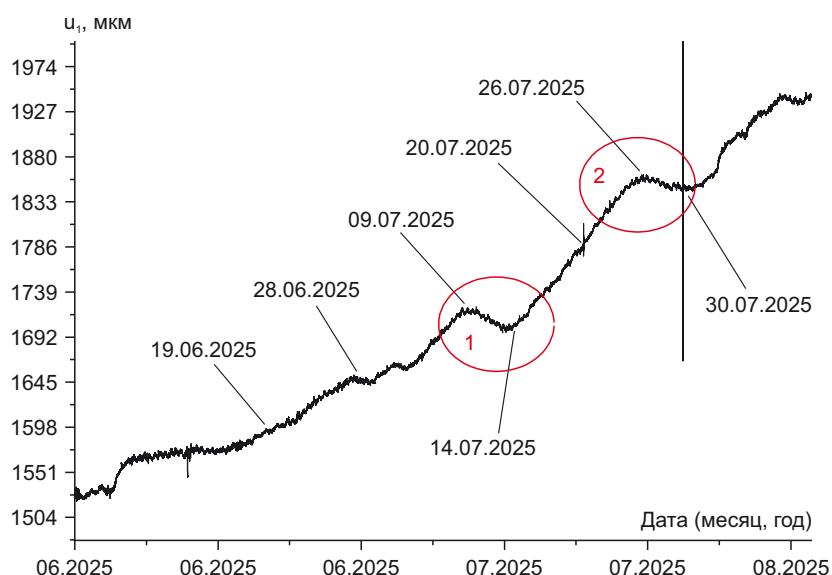


Рис. 10. Масштабированный участок графика продольной компоненты на рис. 8, а (u_1), за период: с 01.06.2025 г. по 12.08.2025 г.
Fig. 10. Scaled section of the longitudinal component graph in Fig. 8, a (u_1), for the period from June 1, 2025 to August 12, 2025.

амплитуды (порядка 300 мкм) предшествуют землетрясениям 20 и 30 июля 2025 г. Землетрясение 20 июля произошло в конце участка с максимальным ростом, и после него можно отметить значительное замедление. Землетрясение 30 июля 2025 г. произошло уже на участке отрицательных скоростей изменения деформации, что можно отчетливо видеть на [рис. 10](#).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, первые результаты анализа деформации горных пород в штольне на о. Шикотан (за неполный год измерений) показывают корректность метода измерения деформаций грунта (что отражают записи приливной волны). Важным результатом является связь ключевых событий на кривой хода деформации с локальным сейсмическим режимом. Так, смена скорости хода деформации происходила два раза, и если в первый раз она могла быть связана с близкими ощущаемыми землетрясениями (март 2025 г.), то во второй раз кривой с вдвое увеличившейся скоростью деформации соответствует период сейсмического роя (с 19 по 28 июня 2025 г.), с окончанием которого скорость хода деформации также перешла к замедлению. Показано, что обе компоненты деформации согласованно отражают прохождение циклонов, что выражается кратковременными (до 8–10 дней) вариациями импульсного характера (без смены тренда). Ввиду высокой чувствительности в изменениях поперечной компоненты не только хорошо прописываются приливы, но и значительно дольше наблюдаются последствия циклонов. Также важным результатом можно считать реакцию обеих компонент на моменты сильных удаленных землетрясений (знакопеременный импульс) 20 и 30 июля 2025 г. к востоку от п-ова Камчатка. Отмечено также, что в период с 9 по 30 июля 2025 г. на графике продольной компоненты хода деформации отражаются резкие ускорения и замедления, что не характерно для ранее изученного тренда и, возможно, связано с подготовкой сильнейших землетрясений 20 и 30 июля 2025 г.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность директору ИМГиГ ДВО РАН д.ф.-м.н. Л.М. Богомолову за помощь в организации пункта деформационных наблюдений на о. Шикотан.

6. 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.

7. 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.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Activation of the Seismic Process off the Coast of Kamchatka on July 20, 2025, 2025. Information Message (in Russian) [Активизация сейсмического процесса у побережья Камчатки 20 июля 2025 г.: Информационное сообщение]. Available from: <http://mseism.gsras.ru/EqInfo/RequestsHandler?cmd=toinfmsg&imid=292> [Last Accessed August 28, 2025].

Adushkin V.V., Loktev D.N., Spivak A.A., 2008. The Effect of Baric Disturbances in the Atmosphere on Microseismic Processes in the Crust. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 44, 510–517. <https://doi.org/10.1134/S1069351308060086>.

Andreeva M.Yu., Kim Ch.U., 2012. Earthquakes of the Kuril-Kamchatka Region (1737–2009). IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 384 p. (in Russian) [Андреева М.Ю., Ким Ч.У. Землетрясения Курило-Камчатского региона (1737–2009). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2012. 384 с.].

Bogomolov L.M., Kremneva I.P., Veselov O.V., 2021. Scientific Research on the Shikotan Island (Kuril Islands): Horizons Given by the Victory over Militaristic Japan. Bulletin of the Sakhalin Regional Branch of the Russian Geographical Society 1, 13–31 (in Russian) [Богомолов Л.М., Кремнева И.П., Веселов О.В. Научные исследования на острове Шикотан (Курильские острова): горизонты, открытые победой над милитаристской Японией // Известия Сахалинского областного отделения Русского географического общества. 2021. Вып. 1. С. 13–31].

Chebrov V.N., Gusev A.A., Drozni D.V., Mishatkin V.N., Sergeev V.A., Chebrov D.V., Shevchenko Yu.V., 2012. Development of Seismological Observations in the Russian Far East for the Tsunami Warning System. In: E.I. Gordeev, V.N. Chebrov (Eds), Seismological and Geophysical Studies in Kamchatka. On the 50th Anniversary of Detailed Seismological Observations. Novaya Kniga, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 70–104 (in Russian) [Чебров В.Н., Гусев А.А., Дроздин Д.В., Мишаткин В.Н., Сергеев В.А., Чебров Д.В., Шевченко Ю.В. Развитие сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России для службы предупреждения о цунами // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке: К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 70–104].

GOST R 57546–2017, 2017. Earthquakes. Seismic Intensity Scale. Standartinform, Moscow, 27 p. (in Russian) [ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.].

Kirnos D.P., Kharin D.A., 1958. A New Universal Seismograph for Engineering Seismology and Recording of Near Earthquakes. Studia Geophysica et Geodaetica 2 (2), 147–156 (in Russian) [Кирнос Д.П., Харин Д.А. Сейсмограф для изучения колебаний сооружений, сейсмического эффекта взрывов и регистрации близких землетрясений.

Studia Geophysica et Geodaetica. 1958. T. 2. № 2. С. 147–156]. <https://doi.org/10.1007/BF02585195>.

Kostylev D.V., Kostyleva N.V., 2024. Engineering-Seismometric Stations for Assessing Seismic Impacts on the Construction Sites of the Kuril Islands. In: Geodynamic Processes and Natural Disasters. Abstracts of the V All-Russian Scientific Conference with International Participation (May 27–31, 2024). IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p. 51 (in Russian) [Костылев Д.В., Костылева Н.В. Инженерно-сейсмометрические станции для оценки сейсмических воздействий на строительные объекты на Курильских островах // Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы докладов V Всероссийской научной конференции с международным участием (27–31 мая 2024 г.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2024. С. 51].

Kugaenko Yu.A., Saltykov V.A., Sinitsyn V.I., Shishkin A.A., 2008. Long-Term Seismic Noise Investigations on Shikotan Island: First Results. Russian Journal of Pacific Geology 2 (3), 218–227. <https://doi.org/10.1134/S1819714008030032>.

Mezentseva L.I., Kaptyug V.A., 2024. Monthly Hydrometeorological Bulletin of Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute. Meteorological Conditions. October 2024. 22 p. (in Russian) [Мезенцева Л.И., Каптуг В.А. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Метеорологические условия. Октябрь 2024 г. 22 с.]. Available from: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2024/10/2024.10_ch1_meteo.pdf (Last Accessed August 16, 2025).

Mishatkin V.N., Zakharchenko N.Z., Chebrov V.N., 2011. Hardware for the Seismic Subsystem of the Tsunami Warning Service. Seismic Instruments 47 (1), 26–51 (in Russian) [Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З., Чебров В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 1. С. 26–51].

Object No. 370, 1964. Remote Underground Seismic Pavilion in the Village of Malokurilskoe on the Shikotan Island, Sakhalin Region. Design Documentation. Sakhalin-giproprop, Yuzhno-Sakhalinsk (in Russian) [Объект № 370. Выносной подземный сейсмический павильон в п. Малокурильске на о. Шикотан Сахалинской области: Проектная документация. Южно-Сахалинск: Сахалингипропром, 1964].

On the Federal Target Program «Reducing the Risks and Mitigating the Consequences of Natural and Man-Made Emergencies in the Russian Federation Before 2010», 2006. Resolution of the Government of the Russian Federation of January 6, 2006. No. 1. In: Collected Legislation of the Russian Federation. 2006. Iss. 6. Art. 695 (in Russian) [О федеральной целевой программе «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года»: Постановление Правительства Российской Федерации от 6 января 2006 г. № 1 // Собрание законодательства РФ. 2006. № 6. Ст. 695].

OriginPro, 2021. Data Analysis and Graphing Software. OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA. Available from: <https://www.originlab.com/index.aspx?go=Products/Origin> (Last Accessed August 01, 2025).

Ostrovsky A.E., 1961. Study of the Earth Tides. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, 76 p. (in Russian) [Островский А.Е. Изучение земных приливов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 76 с.].

Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.N., Soloviev S.L., 1971. Tilt-Measuring Observations on the Shikotan Island. Doklady of the USSR Academy of Sciences 200 (1), 94–96 (in Russian) [Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Соловьев С.Л. Наклономерные наблюдения на о. Шикотан // Доклады АН СССР. 1971. Т. 200. № 1. С. 94–96].

Quartz Strainmeter, 1981. In: Catalog of Geophysical Equipment. Information Reference Book. Iss. 4. Nauka, Moscow, p. 146–148 (in Russian) [Кварцевый деформограф // Каталог геофизической аппаратуры: Информационный справочник. М.: Наука, 1981. Вып. 4. С. 146–148].

Salko D.V., Bornyakov S.A., 2014. The Automated Tool System for Monitoring of Geophysical Parameters on Geodynamic Polygons. Pribory 6, 24–28 (in Russian) [Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. № 6. С. 24–28].

Shchukin M.A., Kostylev D.V., 2021. Information System of the Sakhalin Branch of the Geophysical Survey RAS. In: Modern Methods of Processing and Interpreting Seismological Data. Abstracts of the XV International Seismological School (Novosibirsk, September 6–10, 2021). GS RAS, Obninsk, p. 108 (in Russian) [Щукин М.А., Костылев Д.В. Информационная система СФ ФИЦ ЕГС РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XV Международной сейсмологической школы (Новосибирск, 06–10 сентября 2021 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 108].

Starovoit O.E., Mishatkin V.N., 2001. Seismic Stations of the Russian Academy of Sciences (as of 2001). GS RAS, Moscow–Obninsk, 88 p. (in Russian) [Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н. Сейсмические станции Российской академии наук (составление на 2001 г.). М.–Обнинск: ГС РАН, 2001. 88 с.].

Strong Earthquake off the East Coast of Kamchatka on July 29, 2025, 2025. Information Message (in Russian) [Сильное землетрясение у восточного побережья Камчатки 29 июля 2025 г.: Информационное сообщение]. Available from: <http://mseism.gsras.ru/EqInfo/RequestsHandler?cmd=toinfmsg&imid=294> (Last Accessed August 28, 2025).

Tarakanov R.Z., Kim Ch.U., Sukhomlinova R.N., 1976. Structural Features of Focal Zones of the Kuril-Kamchatka and Japan Regions. In: Seismicity and Deep Structure of Siberia and the Far East. Proceedings of SakhKNII. Iss. 39. Vladivostok, p. 99–109 (in Russian) [Тараканов Р.З., Ким Чун Ун, Сухомлинова Р.Н. Особенности строения фокальных зон Курило-Камчатского и Японского регионов // Сейсмичность и глубинное строение Сибири и

Дальнего Востока: Труды СахКНИИ. Владивосток, 1976. Вып. 39. С. 99–109].

Tikhonov I.N., Shevchenko G.V. (Eds), 2015. The Shikotan Earthquake and Tsunami of October 4 (5), 1994. In: Chronicle of Events, Analysis of Consequences and Current State of the Problem. Collection of Articles. 2nd Ed. IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 128 p. (in Russian) [Тихонов И.Н., Шевченко Г.В. Шикотанское землетрясение и цунами 4 (5) октября 1994 года // Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы: Сборник статей. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 2-е изд. 128 с].

Vyalykh V.F., Naumenko B.N., 1978. Some Preliminary Results of Tiltmeter Observations on the Shikotan Island in 1975. In: A.A. Ivashchenko (Ed.), Processing of Seismological Observations and Searching for Earthquake Precursors in the Far East. Far East Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, Vladivostok, p. 111–116 (in Russian) [Вялых В.Ф., Науменко Б.Н. Некоторые предварительные результаты наклонометрических наблюдений на о. Шикотан в 1975 г. // Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке / Ред. А.А. Иващенко. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 111–116].