

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-157-172>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.34, 550.348



Аппаратурно-программный комплекс сети наклономерных наблюдений за деформационными процессами на полуострове Камчатка

В. Е. Глухов^{1,2}, Е. О. Макаров^{1,2}, С. В. Болдина¹*

¹ Камчатский филиал ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия

² Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

Аннотация. На полуострове Камчатка в 2019 г. были возобновлены наблюдения за наклонами земной поверхности. Целью наблюдений является получение дополнительной информации о медленных движениях земной поверхности, обусловленных различными геодинамическими явлениями. В первую очередь, это относится к изучению связи деформации с региональной сейсмичностью, а также с подготовкой и динамикой вулканических извержений. Помимо изучения медленных движений, сеть наклономерных станций может использоваться для исследования земных приливов. Перечисленные выше задачи могут быть решены лишь при наличии соответствующих средств сбора, обработки и хранения получаемой информации. Основной технической сложностью при создании аппаратно-программного комплекса (АПК), являлась разнотипность имеющегося в наличии оборудования. В работе приводится описание программных и технических решений, использованных при реорганизации сети наклономерных наблюдений. В качестве примера работы комплекса приводятся результаты ретроспективного анализа данных, позволяющие предполагать наличие отклика в наклономерных данных на Земные приливы. Основное направление дальнейшего развития АПК - создание дополнительных программных модулей обработки, которые могут быть выборочно использованы в зависимости от поставленной задачи. Кроме того, ведется работа по предоставлению пользовательского доступа в исследовательских целях к накопленному архиву данных.

Ключевые слова: деформация, наклономер, вулкан, землетрясение, полуостров Камчатка, приливные деформации

Получение: 15.09.2023; Исправление: 16.10.2023; Принятие: 31.10.2023; Публикация онлайн: 02.11.2023

Для цитирования. Глухов В.Е., Макаров Е.О., Болдина С.В. Аппаратурно-программный комплекс сети наклономерных наблюдений за деформационными процессами на полуострове Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 44. № 3. С. 157-172. EDN: WDRVAM. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-157-172>.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «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/>).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: glukhov_v@emsd.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Глухов В. Е., Макаров Е. О., Болдина С. В., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Hardware and Software Complex of the Tilt-Measuring Observations Network of Deformation Processes on the Kamchatka Peninsula

V. E. Glukhov^{1,2}, E. O. Makarov^{1,2}, S. V. Boldina¹*

¹ Kamchatka branch FSBIS FRC Unified Geophysical Service of the RAS, 683006, Kamchatka Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa boulevard, 9, Russia

² FSBEI HE Kamchatka State University named after Vitus Bering, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, st. Pogranichnaya, 4, Russia

Abstract. On the Kamchatka Peninsula, observations of the slopes of the earth's surface were resumed in 2019. The purpose of the observations is to obtain additional information about the slow movements of the earth's surface caused by various geodynamic phenomena. First of all, this relates to the study of the relationship between deformation and regional seismicity, as well as the preparation and dynamics of volcanic eruptions. In addition to studying slow movements, a network of tilt-metering stations can be used to study the Earth's tides. The problems listed above can be solved only if there are appropriate means of collecting, processing and storing the information received. The main technical difficulty in creating a hardware-software complex (HSC) was the diversity of available equipment. The paper provides a description of the software and technical solutions used in the reorganization of the tiltmeter observation network. As an example of the operation of the complex, the results of a retrospective data analysis are presented, which suggest the presence of a response in tiltmeter data to Earth tides. The main direction of further development of the agro-industrial complex is the creation of additional software processing modules that can be selectively used depending on the task at hand. In addition, work is underway to provide user access for research purposes to the accumulated data archive.

Key words: deformation, tiltmeter, volcano, earthquake, Kamchatka Peninsula, tidal deformations

Received: 15.09.2023; Revised: 16.10.2023; Accepted: 31.10.2023; First online: 02.11.2023

For citation. Glukhov V.E., Makarov E.O., Boldina S.V. Hardware and software complex of the tilt-measuring observations network of deformation processes on the Kamchatka peninsula. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, 44: 3, 157-172. EDN: WDRVAM. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-157-172>.

Funding. The work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia (within the framework of the state task No. 075-01271-23) and using data obtained at the unique scientific installation "Seismoinfrasound complex for monitoring of the Arctic cryolithozone and the complex of continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world" (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: glukhov_v@emsd.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Glukhov V. E., Makarov E. O., Boldina S. V., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)



Введение

Наклономерные наблюдения, позволяющие регистрировать очень малые наклоны основания, на котором установлены приборы, занимает особое место в современной геодинимике. Как следует из физических основ теории измерений, чувствительность (или разрешение) метода – это его способность к выявлению сигнала определенной амплитуды. Точность – это способность прибора (метода) выявлять полезный сигнал на фоне помех. Самым чувствительным методом измерения геодеформаций является наклономерно-деформометрический [1].

Существует ряд факторов, оказывающих существенное воздействие на результаты регистрации наклонов земной поверхности, которые сложно учесть с достаточной точностью в силу их количества и разнообразия. К таким факторам относятся: особенности геологического строения места наблюдения, вариации атмосферного давления, сезонный и суточный температурный ход и т.п. Для наклонов, не связанных с приливными деформациями, получение количественных характеристик действующих сил обычно сопряжено с большими трудностями либо в принципе невозможно. Такие наклоны рассматриваются с целью изучения влияния вариаций напряженно-деформированного состояния геосреды на деформацию дневной поверхности, в том числе как возможный прогностический признак землетрясений в сейсмоактивных районах или извержений вулканов. Результаты наклономерных наблюдений могут существенно дополнять данные геодезических измерений при изучении относительных движений отдельных блоков земной коры, а также смещений по разломам [2].

Область прикладных задач, решаемых с помощью наклономерных наблюдений, включает в себя регистрацию относительно больших углов наклона в течение длительного времени. Это, в первую очередь, относится к мониторингу деформационных процессов сложных инженерных сооружений – мостов, плотин, машинных залов АЭС и т.д., а также к регистрации откликов в деформационном поле земной поверхности в районах месторождений полезных ископаемых, обусловленных производством горных работ при образовании подземных выработок, перемещении больших объемов пород и др. [3].

На полуострове Камчатка наклономерные наблюдения в районе Ключевской группы вулканов (КГВ) начали проводиться под руководством Н.А. Жаринова в конце 70X годов прошлого века. Комплекс деформационных измерений, проведенных с использованием наклономеров во время Большого Толбачинского трещинного извержения (БТТИ), можно назвать началом изучения деформаций земной поверхности на активных вулканах в России [4, 5].

После длительного перерыва в 2010 г. на полуострове Камчатка были возобновлены наблюдения за наклонами земной поверхности. Организованная совместно с Хоккайдским университетом (Институт сейсмологии и вулканологии, Саппоро, Япония) сеть наклономерных станций позволяла следить за деформациями земной коры в районах КГВ и Петропавловск-Камчатского геодинимического полигона (ПКГП) [6]. В 2017 г. наблюдения были прекращены, часть станций была демонтирована.

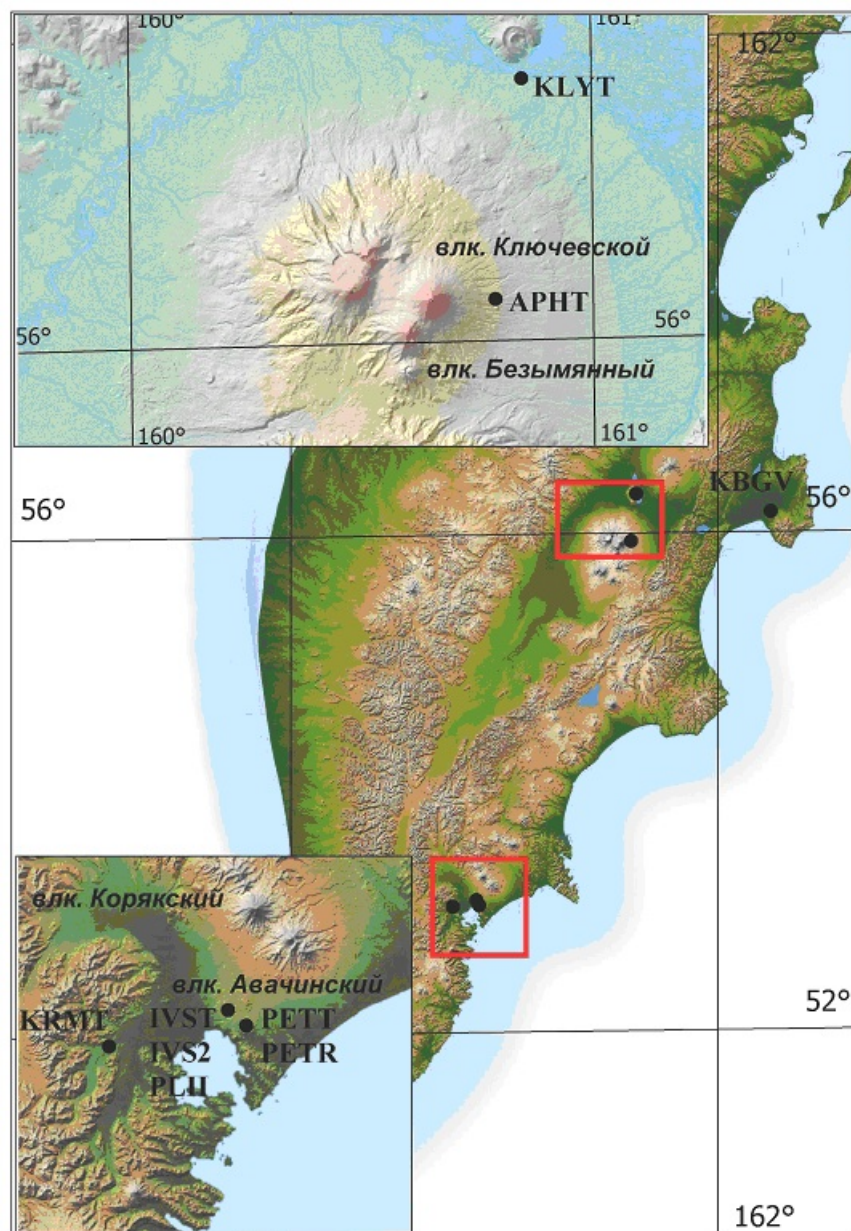


Рис. 1. Схема расположения пунктов наклономерных наблюдений на полуострове Камчатка. На верхней врезке показан район КГВ (пункты KLYT, APHT), на нижней врезке станции на ПКГП (пункты PETT, PETR, KRMT, IVST, IVS2, PLII)

[Fig. 1. Scheme of the location of tilt meter observation points on the Kamchatka Peninsula. The upper inset shows the KGV area (points KLYT, APHT), the lower inset shows the station at PKGP (points IVST, PETT, PETR, KRMT, IVS2, PLII)]

В 2019 г. было принято решение о возобновлении постоянных наклономерных наблюдений в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН под руководством д.ф.-м.н. П.П. Фирстова. Были восстановлены и созданы заново 8 пунктов наблюдений (рисунок 1). Краткая сводка по аппаратурному оснащению пунктов,

их расположению и времени регистрации приведена в таблице 1. Целью наблюдений является получение дополнительной информации о медленных движениях земной поверхности, обусловленных различными геодинамическими явлениями. В первую очередь, это относится к изучению связи деформации земной поверхности с региональной сейсмичностью, а также с подготовкой и динамикой вулканических извержений. Также актуальной задачей является поиск во временных рядах наклономерных данных возможных предвестниковых сильных землетрясений и вулканических извержений. Помимо изучения медленных движений сеть наклономерных станций может использоваться для исследования земных приливов. Перечисленные выше задачи могут быть решены лишь при наличии соответствующих средств сбора, обработки и хранения получаемой информации.

Таблица 1

Координаты расположения пунктов наклономерных наблюдений, время начала их работы и основные технические характеристики аппаратуры, ϕ – широта, λ – долгота, h – высота над уровнем моря, f – частота оцифровки, с/с – сейсмостанция) [Coordinates of stations in the network created after 2019. The main technical characteristics of the equipment and the start time of operation are given, ϕ – latitude, λ – longitude, h – elevation, f – digitized frequency, с/с – seismic station]

Пункт размещения/ код	Датчик	Координаты			Регистратор/ разрядность, бит.
		ϕ, N	λ, W	h, m	
с/с «Апахончич»/ АРНТ	701-2А	55.993	160.842	744	LS7000ХТ / 24
с/с «Карымшино»/ KRMT	701-2А	52.857	158.13	114	HKS-9550/24
с/с «Ключи»/ KLYT	701-2	56.316	160.857	43	LS7000ХТ / 24
с/с «Крутоберегово»/ KBGV	701-2А	56.258	162.711	17	HKS-9550 / 24
с/с «Петропавловск»/ PETT	701-2	53.023	158.650	97	LS7000ХТ / 24 L-Card E502 / 16
с/с «Петропавловск»/ PETR	ИН-Д3 360	53.023	158.650	97	ИН-Д3 360 / 24
с/с «Центр Цунами»/ IVS2	701-2А	53.065	158.608	190	L-Card E502 / 16
с/с «Центр Цунами»/ IVST	701-2А	53.065	158.608	190	GeoSIGGSR-24 / 24
с/с «Центр Цунами»/ PLII	МПЛИ	53.065	158.608	190	DT9824 / 24

Таблица 2

Продолжение таблицы 1 [Table continuation 1]

Код	Диапазон, мкРад	f, Гц	Глубина кам., м	Начало работы	Окончание работы	Возврат к работе
APHT	8000	100/1	4.5	06.09.2011	12.07.2017	27.08.2021
KRMT	8000	100	4.5	23.09.2011	13.03.2017	01.03.2023
KLYT	8000/800	100	11.5	05.06.2012	13.07.2017	30.04.2019
KBGV	8000	100	2.5			21.10.2022
PETT	8000/800	100	0	23.11.2011	17.09.2017	10.06.2020
PETR	1700	16	0			24.03.2020
IVS2	8000	100	5.0			22.12.2022
IVST	8000	100	5.0			23.02.2019
PLII	100	20	5.0			07.12.2022

В качестве датчиков в разные годы использовались несколько типов наклономеров, в частности, две модификации платформенных двухосевых пузырьковых сенсоров Applied Geomechanics 701 серии производства Applied Geomechanics Inc, USA (в настоящее время название производителя изменено на JewellInstruments) – 701-2 и 701-2(4х) (далее AP 701) [7]. Кроме этого, в настоящее время в тестовом режиме используется малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр (далее МПЛИ), произведенный Лабораторией ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), и наклонмер ИН-ДЗ 360 производства НТП «Горизонт», РФ [8].

Автоматизированная система сбора, предварительной обработки и хранения

Основная техническая задача, возникшая при создании наклономерной сети – организация сбора, предварительной обработки и распределенного хранения данных в автоматическом режиме. На основе имеющейся аппаратной базы с учетом ее разнотипности был создан и внедрен в эксплуатацию аппаратурно-программный комплекс (АПК), представляющий собой законченное решение в рамках этой задачи. Структурная схема созданной системы обработки и хранения данных сети наклономерных наблюдений приведена на рисунке 2.

Станции KLYT и IVST интегрированы в Систему сбора и передачи данных сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России [9]. Данные передаются в Центр сбора данных в реальном времени. Регистраторы Datamark LS7000XT, установленные на этих станциях, позволяют реализовать резервное хранение исходных данных на карте флеш-памяти в WIN-формате. Синхронизация данных по времени производится непосредственно регистраторами при помощи сигнала GPS. Частота дискретизации данных составляет 100 Гц.

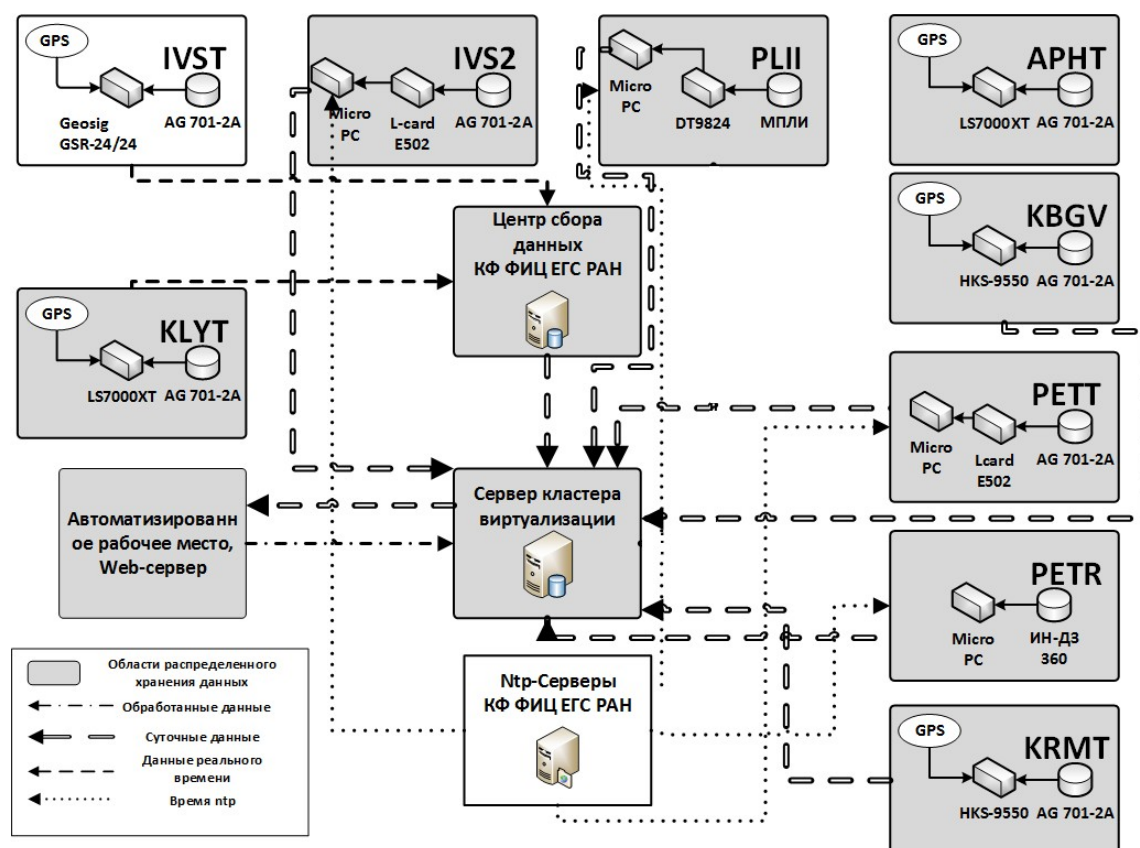


Рис. 2. Структурная схема системы сбора и обработки данных сети наклономерных наблюдений на полуострове Камчатка

[Fig. 2. Block diagram of the system for collecting and processing data from the tiltmeter observation network on the Kamchatka Peninsula]

Задача получения данных на станции PETT и тестовой станции IVS2 решалась с помощью включения в аппаратный комплекс АЦП L-Card E502 и микрокомпьютера. Синхронизация системного времени компьютера осуществляется с серверами КФ ФИЦ ЕГС РАН по ntp-протоколу. Для регистрации с помощью АЦП L-Card E502 используется программное обеспечение, созданное на базе библиотек, доступных из открытых репозиториях производителя оборудования, что позволяет использовать на микрокомпьютере наиболее удобную в данном случае ОС семейства Linux. Порядок работы созданного программного обеспечения следующий: один раз в час из блоков данных формируется часовой файл с дискретизацией данных 100 Гц. По окончании суток путем осреднения из часовых файлов формируется 24-часовой файл с дискретизацией один отсчет в минуту. Блоки данных удаляются, часовые файлы архивируются и хранятся отдельно. Скачивание данных за прошедшие сутки происходит по расписанию в начале следующих суток.

На станции PETR получение данных со встроенного АЦП накломера ИН-ДЗ 360 также осуществляется при помощи микрокомпьютера под управлением ОС Windows XP с помощью программного обеспечения, поставляемого

производителем вместе с наклономером. Синхронизация системного времени выполняется по ntp-протоколу. Данные передаются по USB-порту. Суточные данные сохраняются в формате ASCII с дискретизацией 16 Гц. Скачивание данных происходит один раз в сутки по протоколу FTP.

Станции KRMT и KBGV оснащены регистраторами HKS-9550, подключение к компьютерной сети у данной модели осуществляется через отдельный интерфейсный блок. Данный комплект позволяет реализовать резервное хранение исходных данных на карте флеш-памяти в WIN-формате. Синхронизация данных по времени производится непосредственно регистраторами при помощи сигнала GPS. Частота дискретизации данных составляет 100 Гц. Передача данных на сервер происходит один раз в сутки по FTP-протоколу.

Тестовая станция PLII, созданная на основе МПЛИ, двух АЦП DT9824 и микрокомпьютера, накапливает данные на внутренней памяти, которые затем один раз в сутки загружаются на сервер. Синхронизация системного времени компьютера осуществляется с серверами КФ ФИЦ ЕГС РАН по ntp-протоколу.

Удаленное расположение станции APHT не позволяет организовать подключение к сети сбора данных. Станция полностью автономна. Питание осуществляется от аккумуляторных батарей общей емкостью 120 Ач. Зарядка батарей производится от солнечных панелей, кроме этого для бесперебойной работы станции питание имеет резервный источник на основе батарей типа «Бакен». Регистратор Datamark LS7000XT, позволяет хранить исходные данные на карте флеш-памяти в WIN-формате. Скачивание данных происходит при посещении станции. Частота дискретизации 1 Гц. Регистратор синхронизирует время при помощи сигнала GPS.

Условия распределенного хранения данных зависят от возможностей регистрирующей аппаратуры. Данные, получаемые со станций IVST и KLYT, сохраняются непосредственно в архиве на сервере Центра сбора данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. Для дальнейшей обработки и хранения был создан выделенный сервер. Раз в сутки осуществляется получение данных всех восьми станций. Данные станций IVST и KLYT загружаются из архива. Данные с PETT PETR, IVS2, PLII загружаются непосредственно с микрокомпьютеров станций. Все данные сохраняются в каталоге в ascii и csv форматах с дискретизацией один отсчет в минуту и подходят для дальнейшей обработки в пакете DIMAS [10]. Для получения данных со станций KBGV и KRMT используется ftp-протокол.

Последующая обработка организована на рабочем месте оператора. Автоматически по расписанию с сервера загружаются данные за последние сутки. Далее без участия оператора обрабатываются все данные сети. Вводятся аппаратурные поправки, осуществляется коррекция уровней для тех станций, на которых производилась калибровка положения сенсора. Для последующей интерпретации от каждой станции создается три выборки данных: временной ряд по каждому каналу с дискретизацией один отсчет в минуту, ряд с дискретизацией один отсчет в час и ряд за прошедшую неделю с дискретизацией один отсчет в минуту. Формат данных выборок позволяет использовать для обработки широкий

спектр прикладных программных пакетов. На основе выборок автоматически для каждого канала станции строятся графики полного ряда данных, данных с часовой дискретизацией и график за последнюю неделю. График канала содержит кривую исходных данных, кривую с компенсацией по температуре, кривую с удаленным трендом и кривую с удаленной сезонной компонентой. Веб-сервер позволяет просматривать графики непосредственно в браузере с любого компьютера организации и из сети Internet.

Пример интерпретации данных сети наклономерных наблюдений

Кроме освещенных ранее вариаций наклонов, связанных с извержениями вулканов и землетрясениями [11], интерес представляет отклик среды на приливное воздействие. Непрерывная регистрация изменения наклонов земной поверхности относительно нормали к ней позволяют использовать данные наклономерных наблюдений для исследования приливных деформаций приповерхностного слоя земной коры.

Впервые описание приливных вариаций наклонов на Камчатке приводится в работе [12]. В ней показано, что основными проблемами при регистрации приливного эффекта в изменениях наклонов земной поверхности является недостаточная разрешающая способность датчиков и влияние вариаций температуры с периодами, близкими к периодам приливных эффектов.

Тем не менее, выполненный анализ архивных данных наблюдений на пунктах KLYT и PETH (рисунок 1, таблица 3) показал возможность выделения приливных деформаций средствами камчатской наклономерной сети.

Параметры приливного отклика временных рядов среднечасовых данных измерения наклонов по направлениям С-Ю и В-З за различные периоды наблюдений (таблица 3) оценивались в скользящем временном окне длиной 30 суток с шагом в одни сутки с использованием программы приливного анализа ETERNA 3.0 [13]. Эта программа позволяет получать параметры приливного отклика экспериментально зарегистрированных временных рядов по отдельным приливному волнам суточной группы (O_1 , Q_1) и полусуточной группы (S_2K_2 , N_2 , M_2).

Для расчета величин приливных параметров отдельных приливных волн в изменениях наклонов – амплитуд, амплитудных факторов и фазовых сдвигов по отношению к соответствующим теоретическим фазам гравитационного потенциала, а также отношения сигнал/шум и ошибок определения указанных параметров использовались синхронные временные ряды среднечасовых значений наклонов, в которых предварительно компенсировались температурное и барометрическое влияние. Для этого использовался алгоритм оценки комплексной передаточной функции от вариаций температуры и атмосферного давления к изменениям наклонов [14]. Из этих компенсированных рядов были исключены

Таблица 3

Пункты наклономерных наблюдений и данные, используемые для приливного анализа) [Observation points and periods]

Пункты наблюдений (рисунок 1)	Координаты, долгота / широта	Период наблюдений	Кол-во суточных данных, / Кол-во исключенных суток
РЕТТ	53.023°N / 158.650°E	01.10.2012-30.12.2013 гг.	428 / 60
РЕТТ	53.023°N / 158.650°E	01.06.2015-01.06.2016 гг.	339 / 30
KLYT	56.316°N / 160.587°E	01.09.2012-26.08.2013 гг.	331 / 60

сутки, в которые происходили сильные землетрясения, вызывающие резкие изменения структуры временного ряда значений наклонов (таблица 3).

По результатам работы программы приливного анализа в изменениях наклонов была выделена волна M_2 из полусуточной группы приливных волн с периодом 12.42 ч, для которой параметры отклика наклона определяются при отношении сигнал/шум > 10 (12.5 – 35). Для других волн суточной и полусуточной групп волн расчетное отношение сигнал/шум было мало и составляло < 10 .

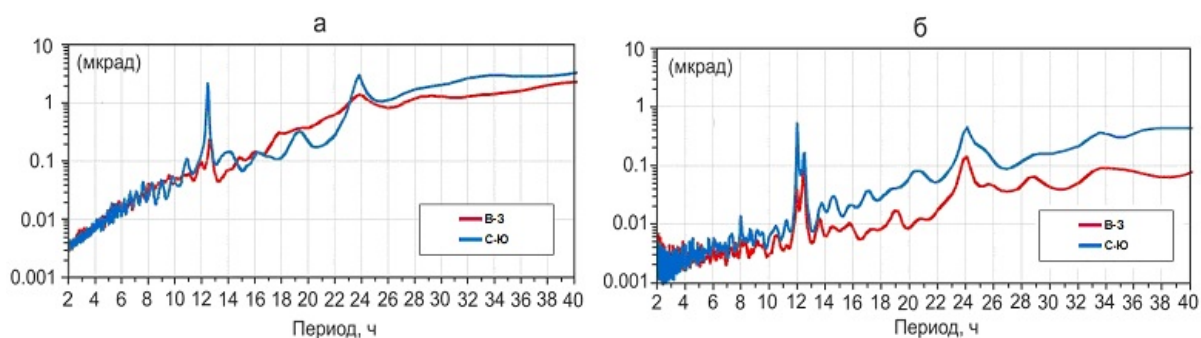


Рис. 3. Спектры мощности вариаций значений наклонов (мкРад) после термокомпенсации по алгоритму [14], зарегистрированных на п. KLYT в период 01.09.2012-26.08.2013 гг. (а) и п. РЕТТ в период 01.10.2012-30.12.2013 гг. (б) методом максимальной энтропии с использованием AR-модели: синяя линия – по направлению С-Ю, красная линия – по направлению В-З

[Fig. 3. Power spectra of variations in slope values (μRad) after thermal compensation according to the algorithm [14], recorded at the KLYT station in the period 09/01/2012-08/26/2013. (a) and item РЕТТ in the period 01.10.2012 - 30.12.2013. (b) maximum entropy method using the AR model: blue line – in the N-S direction, red line – in the E-W direction]

Следует отметить, что в спектрах мощности среднечасовых вариаций наклонов после компенсации температурного влияния, построенных методом максимальной энтропии Бурга, максимум на периоде 12.42 ч также отчетливо выделяется (рисунок 3), особенно по направлению измерения наклонов С-Ю. Как было показано в [12] данные измерений наклонов по направлению С-Ю на Камчатке в меньшей степени подвержены воздействию морского прилива, поэтому в них влияние природных деформационных процессов, связанных с приливным воздействием, а также с сильными землетрясениями и вулканическими извержениями, выражено более отчетливо.

В таблице 4 представлены полученные средние величины приливных параметров волны M_2 : амплитуда волны в изменениях значений наклонов, отношение сигнал-шум, амплитудный фактор и фаза волны.

Таблица 4

Результаты приливного анализа вариаций значений наклонов для всех периодов наблюдений в скользящем временном окне длиной 30 суток с шагом в одни сутки по программе ETERNA 3.0 [13] [Results of tidal analysis of variations in slope values for all observation periods in a sliding time window of 30 days in length with a step of one day using the ETERNA 3.0 program [13]]

Пункт наблюдений, код	Период	Теоретическая амплитуда волны M_2 (A_t), мс (мкРад)	Направление
РЕТТ	01.10.2012 гг.	7.592 (0.037)	В-З
РЕТТ	30.12.2013 гг.	7.592 (0.037)	С-Ю
РЕТТ	01.06.2015 гг.	7.592 (0.037)	В-З
РЕТТ	01.06.2016 гг.	7.592 (0.037)	С-Ю
KLYT	01.09.2012 гг.	7.29 (0.035)	В-З
KLYT	26.08.2013 гг.	7.29 (0.035)	С-Ю

Наиболее представительными являются расчетные данные по направлению С-Ю, т.к. они в меньшей степени подвержены морским приливам [12] и более пригодны для изучения деформационных процессов, связанных с процессами подготовки и реализации сильных землетрясений и вулканических извержений.

В дальнейшем по полученным оценкам амплитуды, амплитудного фактора и фазового сдвига волны M_2 в изменениях значений наклонов будет проанализирована изменчивость этих величин во времени с целью поиска предвестников местных сильных землетрясений [15].

Таблица 5

Продолжение таблицы 4 [Table continuation 4]

Код	Координаты			
	Отношение: сигнал / шум	Амплитуда волны M_2 (Ан), мс (мкРад)	Амплитудный фактор M_2 , Ан/Ат	Фаза M_2 , град.
РЕТТ	21	12.92 (0.06)	1.70 ± 0.16	-127.4 ± 5.3
РЕТТ	12.5	16.3 (0.08)	2.15 ± 0.30	-82.7 ± 8.8
РЕТТ	35	13.43 (0.07)	1.77 ± 0.10	-98.4 ± 3.63
РЕТТ	17	15.81 (0.08)	2.08 ± 0.24	-57.1 ± 6.8
KLYT	10	14.26 (0.07)	1.96 ± 0.53	68.5 ± 19.3
KLYT	24.8	46.34 (0.22)	6.36 ± 0.59	-34.7 ± 5.4

Заключение

Сеть наклономерных станций структурно может дополнить развернутую КФ ФИЦ ЕГС РАН систему GNSS наблюдений [9]. Получаемые данные дают дополнительные сведения в области изучения деформационных процессов, связанных с мощными геодинамическими событиями (землетрясения и вулканические извержения). Так перед Охотоморским землетрясением 24 мая 2013 г. с $M_w=8.3$ и глубиной очага 630 км одновременное возникновение аномалии в поведении наклонов на двух пунктах KLYT и APNT и условных деформации удаленной форшоковой активизации в Авачинском заливе говорит о едином геодинамическом процессе регионального масштаба, предшествующем землетрясению [6, 11]. Поэтому, есть основания полагать, что оперативные данные могут быть использованы при краткосрочном прогнозе сильных землетрясений и вулканических извержений.

При наличии дополнительных комплектов регистрации АПК позволяет быстро организовать сбор информации в автоматическом режиме с любого количества станций сети. К сожалению, в настоящее время число действующих наклономерных станций явно не обеспечивает желаемой детальности сведений о деформационной обстановке в районах ПКГП и КГВ. Авторы надеются, что в ближайшие годы сеть пополнится новыми станциями.

Дальнейшее развитие АПК предполагает создание дополнительных программных модулей обработки, которые могут быть выборочно использованы в зависимости от поставленной текущей задачи. Для использования оперативных данных наблюдений при краткосрочном прогнозе технически возможен перевод АПК в режим регистрации близкий к реальному времени. В перспективе необходимо расширение сети автономных станций, что в свою очередь потребует конкретных технических и программных решений в области обеспечения питания, хранения данных, решение проблем, связанных с условиями установки регистрирующей аппаратуры, изменения текущих параметров обработки.

Аббревиатуры

КГВ	Ключевской группы вулканов
БТТИ	Большого Толбачинского трещинного извержения
ПКГП	Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона
AP 701	Applied Geomechanics 701
МПЛИ	малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр
ОИЯИ	Объединенный институт ядерных исследований
АПК	аппаратурно-программный комплекс
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
ASCII	American standard code for information interchange
FTP	File Transfer Protocol

Список литературы

1. Кузьмин Ю. О., Современная геодинамика от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов, *Физика Земли*, 2019. № 1, С. 78–103 DOI: 10.31857/S0002-33372019178-103.
2. Островский А. Е. *Деформация земной коры по наблюдениям наклонов*. Москва: Наука, 1978. 184 с.
3. Кузьмин Ю. О., Относительные деформации изгиба земной поверхности и оценка геодинамической опасности объектов, *Маркирейдерский вестник*, 2015. № 5, С. 47–52.
4. Жаринов Н. А. и др., О наклонах земной поверхности при образовании Второго конуса Большого трещинного Толбачинского извержения 1975 г. / *Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975--1976 гг.*. Москва, Наука, 1978, С. 213–216.
5. Жаринов Н. А. Об изучении деформаций земной поверхности на Ключевском вулкане (1972-1982 гг.), *Вулканология и сейсмология*, 1984. № 4, С. 67–75.
6. Фирстов П. П. и др., Наклономерные наблюдения на полуострове Камчатка в 2012-2016 гг., *Сейсмические приборы*, 2021. Т. 57, № 1, С. 49–68 DOI: 10.21455/si2021.1-4.
7. Технические характеристики наклономеров серии А701 URL: jewellinstruments.com (доступ: 31.10.2023).
8. Информационный буклет ИН-ДЗ URL: www.ntpgorizont.ru (доступ: 31.10.2023).
9. Чебров В. Н. и др., Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г., *Вулканология и сейсмология*, 2013. № 1, С. 18–40 DOI: 10.7868/S0203030613010021.
10. Дроздин Д. В., Дроздина С. Я., Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS, *Сейсмические приборы*, 2010. Т. 46, № 3, С. 22–34.
11. Фирстов П. П. и др., Геодинамические процессы, предшествующие глубокому Охотоморскому землетрясению 24 мая 2013 года с магнитудой $M_w=8.3$, *Докл. РАН*, 2019. Т. 489, № 3, С. 303–306 DOI: 10.31857/S0869-56524893303-306.
12. Широков И. А. и др., Вариации наклонов земной поверхности на Камчатке в районе Ключевского вулкана, *Вулканология и сейсмология*, 2009. № 6, С. 44–53.
13. Wenzel H. G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0, *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 1994. № 118, С. 8719–8721.
14. Любушин А. А., Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга, *Физика Земли*, 1993. № 3, С. 103–108.
15. Копылова Г. Н., Болдина С. В. Скважинные уровнемерные наблюдения в системе геофизического мониторинга на Камчатке / *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*, Труды Седьмой научно-технической конференции (29 сентября – 7 октября). Петропавловск-Камчатский, Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019, С. 61–71.

Информация об авторах



Глухов Виталий Евгеньевич ✉ – Инженер, Лаборатория исследований и мониторинга сильных землетрясений, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Пийпа, 9; научный сотрудник, Международная интегративная научно-исследовательская лаборатория экстремальных явлений, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга (КамГУ им. Витуса Беринга), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Пограничная, 4,  ORCID 0009-0003-7098-6469.



Макаров Евгений Олегович ✉ – кандидат физико-математических наук, Старший научный сотрудник, Лаборатория акустического и радонового мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия; Ведущий научный сотрудник, Международная интегративная научно-исследовательская лаборатория экстремальных явлений, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга (КамГУ им. Витуса Беринга), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Пограничная, 4, Россия,  ORCID 0000-0002-0462-3657.



Болдина Светлана Васильевна ✉ – кандидат геолого-минералогических наук, Старший научный сотрудник, Лаборатория геофизических исследований, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия,  ORCID 0000-0001-7234-0053.

References

- [1] Kuz'min Yu. O., *Sovremennaya geodinamika ot dvizheniy zemnoy kory do monitoringa otvetstvennykh ob"ektov* [Modern geodynamics from crustal movements to monitoring of critical facilities], *Fizika Zemli* [Earth Physics], 2019, no. 1, pp. 78–103, (In Russian DOI: 10.31857/S0002-33372019178-103.).
- [2] Ostrovskiy A. E. *Deformatsiya zemnoy kory po nablyudeniya naklonov* [Crustal deformation from tilt observations]. Moscow: Science, 1978, 184 pp., (In Russian).
- [3] Kuz'min Yu. O., *Otnositel'nye deformatsii izgiba zemnoy poverkhnosti i otsenka geodinamicheskoy opasnosti ob"ektov* [Relative bending deformations of the earth surface and assessment of geodynamic hazard of objects], *Markshreyderskiy vestnik* [Markshneider's Bulletin], 2015, no. 5, pp. 47–52, (In Russian).
- [4] Zharinov N. A. et al., *O naklonakh zemnoy poverkhnosti pri obrazovanii Vtorogo konusa Bol'shogo treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya 1975 g.* [On the slopes of the Earth's surface during the formation of the Second cone of the Great Tolbacha fissure eruption of 1975.], In book: *Geologicheskie i geofizicheskie dannye o Bol'shom treshchinnom Tolbachinskom izverzhenii 1975–1976 gg.* [Geologic and geophysical data on the 1975–1976 Great Tolbacha fissure eruption.], 1978, Moscow: Science, pp. 213–216, (In Russian).
- [5] Zharinov N. A., *Ob izuchenii deformatsiy zemnoy poverkhnosti na Klyuchevskom vulkane (1972-1982 gg.)* [On the study of earth surface deformations at the Kliuchevskoi volcano (1972-1982)], *Vulkanologiya i seysmologiya* [Volcanology and seismology], 1984, no. 4, pp. 67–75, (In Russian).
- [6] Firstov P. P. et al., *Naklonomernye nablyudeniya na poluostrove Kamchatka v 2012-2016 gg.* [Inclination observations on the Kamchatka Peninsula in 2012-2016], *Fizika Zemli* [Seismic instruments], 2021, vol. 57, no. 1, pp. 49–68, (In Russian DOI: 10.21455/si2021.1-4.).
- [7] A701 Series Tiltmeter Specifications URL: jewellinstruments.com (access: 31.10.2023)
- [8] *Informatsionnyy buklet IN-D3* [Information booklet IN-D3] URL: www.ntpgorizont.ru (access: 31.10.2023)
- [9] Chebrov V. N. et al., *Sistema detal'nykh seysmologicheskikh nablyudeniya na Kamchatke v 2011 g.* [System of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011], *Vulkanologiya i seysmologiya* [Volcanology and seismology], 2013, no. 1, pp. 18–40, (In Russian DOI: 10.7868/S0203030613010021.).
- [10] Droznin D. V., Droznina S. Ya., *Interaktivnaya programma obrabotki seysmicheskikh signalov DIMAS* [Interactive seismic signal processing program DIMAS], *Fizika Zemli* [Seismic instruments], 2010, vol. 46, no. 3, pp. 22–34, (In Russian).
- [11] Firstov P. P. et al., *Geodinamicheskie protsessy, predshestvuyushchie glubokomu Okhotomorskuyu zemletryaseniyu 24 maya 2013 goda s magnitudoy Mw=8.3* [Geodynamic processes preceding the deep Okhotomorsk earthquake on May 24, 2013 with magnitude Mw=8.3], *Dokl. RAN* [RAS Reports], 2019, vol. 489, no. 3, pp. 303–306, (In Russian DOI: 10.31857/S0869-56524893303-306.).
- [12] Shirokov I. A. et al., *Variatsii naklonov zemnoy poverkhnosti na Kamchatke v rayone Klyuchevskogo vulkana* [Variations of Earth Surface Tilts in Kamchatka in the Area of Kliuchevskoi Volcano], *Vulkanologiya i seysmologiya* [Volcanology and seismology], 2009, no. 6, pp. 44–53, (In Russian).
- [13] Wenzel H. G., *Earth tide analysis package ETERNA 3.0*, *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 1994, no. 118, pp. 8719–8721, (In Russian).
- [14] Lyubushin A. A., *Mnogomernyy analiz vremennykh ryadov sistem geofizicheskogo monitoringa* [Multivariate analysis of time series of geophysical monitoring systems], *Fizika Zemli* [Earth Physics], 1993, no. 3, pp. 103–108, (In Russian).

- [15] Kopylova G.N., Boldina S.V., Skvazhinnye urovnemernye nablyudeniya v sisteme geofizicheskogo monitoringa na Kamchatke [Well level observations in the geophysical monitoring system in Kamchatka], In: Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East], Proceedings of the Seventh Scientific and Technical Conference (September 29 – October 7), Petropavlovsk-Kamchatsky, Obninsk: FRTs EGS RAN [Obninsk: FRC EGS RAS], 2019, pp. 61–71, (In Russian).

Information about authors



Glukhov Vitaly Evgenevich ✉ – Engineer, Laboratory of research and monitoring of strong earthquakes, Kamchatka branch of Federal Research Center "Unified Geophysical Service of RAS" (KF FRC EGS RAS), Kamchatka, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa, 9; Researcher, International integrative research laboratory of extreme phenomena, Vitus Bering Kamchatka State University, Kamchatka, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya, 4,  ORCID 0009-0003-7098-6469.



Makarov Evgeny Olegovich ✉ – Candidate of Phys. & Math. Sciences, Senior Researcher, Kamchatka branch of Federal Research Center "Unified Geophysical Service of RAS" (KF FRC EGS RAS), Kamchatka, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa, 9, Lead researcher, International integrative research laboratory of extreme phenomena, Vitus Bering Kamchatka State University, Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya, 4,  ORCID 0000-0002-0462-3657.



Boldina Svetlana Vasilevna ✉ – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of geophysical research, Kamchatka branch of Federal Research Center "Unified Geophysical Service of RAS" (KF FRC EGS RAS), Kamchatka, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa, 9,  ORCID 0000-0001-7234-0053.