

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.348.436:551.24:550:34
Рег. N НИОКТР 124093000045-0
Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН
_____ П.Н. Шебалин
«____» _____ 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ РАЗНОМАСШТАБНОГО
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА КАМЧАТКЕ
(промежуточный, этап 2025 г.)

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр., зав. лаб.,
д.ф.-м.н., профессор РАН _____ Г.М. Стеблов
Подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр., зав. лаб.,
д.ф.-м.н., проф. РАН

Подпись, дата

Г.М. Стеблов
(введение, разделы 1-3,
заключение)

Исполнители:

гл. науч. сотр.
академик РАН

Подпись, дата

Л.И. Лобковский.
(раздел 1)

вед. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

И.С. Владимирова
(разделы 1-2)

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

А.А. Баранов
(раздел 1)

науч. сотр.

Подпись, дата

В.С. Вдовин
(разделы 1, 3)

науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

В.А. Тимофеева
(раздел 1)

мл. науч. сотр.

Подпись, дата

С.А. Брикова
(раздел 2)

мл. науч. сотр.

Подпись, дата

М.С. Гридчина
(раздел 2)

мл. науч. сотр.

Подпись, дата

Г.Э. Мельник
(разделы 1-2)

мл. науч. сотр.

Подпись, дата

Я.В. Туркин
(раздел 2)

Нормоконтроль

Подпись, дата

О.В. Селюцкая

РЕФЕРАТ

Отчет 34 с., 1 кн., 15 рис., 14 источн., 2 прил.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, КАМЧАТКА, СЕЙСМИЧЕСКАЯ И ВУЛКАНИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ, СПУТНИКОВАЯ ГЕОДЕЗИЯ, СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ГНСС

Исследования по теме НИР выполняются в рамках Комплексной межведомственной программы по изучению и развитию уникальной территории Камчатского края «Третья Камчатская экспедиция» по направлению «Вулканология и сейсмология Камчатки» в сотрудничестве с Камчатским филиалом Федерального Исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» и с Институтом вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Исследования, проводимые по теме НИР в 2025 г., включали: практическое применение теоретических основ изучения тектонической активности подвижных регионов Северной Евразии на различных масштабных уровнях на основе комплексной интерпретации спутниковых геодезических данных Камчатской региональной наблюдательной сети и развивающейся в настоящее время высокоточной субконтинентальной опорной сети ГНСС; решение методических и практических вопросов развития Камчатского регионального наблюдательного полигона на основе спутниковых геодезических систем. В рамках применения теоретических разработок, выполненных на предшествующем этапе (2024 г.), анализировалась проявления глобальных, континентальных и региональных геодинамических процессов при моделировании движений земной поверхности в региональном масштабе для выявления закономерностей движений в межплитовой контактной зоне и для разделения эффектов от процессов различных масштабов в наблюдаемых поверхностных движениях; анализировались результаты обработки исходных измерений Камчатской региональной сети ГНСС в связи с произошедшим 30 июля 2025 г. (местное время) землетрясением, M 8.8, у восточного побережья Камчатки, их геодинамическая интерпретация, вопросы предсказуемости мегаземлетрясений в Камчатской зоне субдукции, конечная модель очага и её динамика для выявления особенностей воздействия данного события на инфраструктуру региона. В рамках проработки методических и практических вопросов, в частности, мониторинга проявлений активности Авачинской группы вулканов, рассматривалось организация и развитие системы регулярной обработки исходных измерений ГНСС.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	7
1 Сейсмогенный потенциал Камчатки по данным ГНСС	7
2 Модель очага Камчатского землетрясения 2025 г.	16
3 Система спутникового геодезического мониторинга вулканической и сейсмической активности на Камчатке	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 «Смещения пунктов ГНСС Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за 2025 г.».....	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Публикации по теме НИР, изданные в 2025 г.	32

ВВЕДЕНИЕ

Расположение Камчатки в зоне субдукции Тихоокеанской плиты определяет сочетание разномасштабных геодинамических процессов, проявляющихся в наблюдаемых движениях земной поверхности. Наиболее важные аспекты применения систем ГНСС в задачах геодинамики состоят в возможности мониторинга медленных (криповых) движений в земной коре, отражающих процессы подготовки сильных землетрясений и извержений вулканов. Мониторинг этих движений позволяет оценить динамику накопления деформаций, локализацию наиболее интенсивных деформаций, суммарный накопленный сейсмогенный потенциал. Сейсмические процессы (включая предсейсмические, постсейсмические) и вулканизм относятся к числу процессов, наиболее интенсивно проявляющихся на Камчатке.

Широкий охват территории, затронутой статическими сейсмическими смещениями вследствие Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. (местное время), Mw 8.8, подтверждает актуальность применения глобальной геоцентрической отсчётной основы и формирования её субконтинентального сегмента для геодинамического мониторинга сейсмоактивных регионов северной части Евразии и, в частности, ее Дальневосточного побережья. В соответствии с общей концепцией применения общеземной геоцентрической системы отсчёта и с учётом особенностей методики длиннобазисных ВОМО за отчётный период были проанализированы имеющиеся данные ГНСС по Камчатке с использованием системы отсчёта, реализуемой совокупным набором глобально распределённых пунктов ГНСС вместе с сетью ФАГС.

Камчатское землетрясение 30 июля 2025 г. (местное время), Mw 8.8, поставило вопрос о соотнесении межсейсмических деформаций, наблюдавшихся методами спутниковой геодезии, с выделением сейсмического момента и конечной моделью очага мегаземлетрясения. Кроме того, относительно низкая интенсивность воздействий от Камчатского землетрясения 2025 г. (по зафиксированным уровням сотрясений, разрушениям, цунами и т.д.) подтверждает важность моделирования и исследования динамики формирования и распространения сейсморазрыва для таких событий. Методические и практические аспекты указанных вопросов исследованы в [Вдовин, Рублев, 2025; Владимирова и др., 2025; Михайлов и др., 2025; Sobisevich et al., 2025]. За отчётный период по имеющимся высокочастотным данным ГНСС, доступным в оперативном режиме, была проанализирована конечная модель очага и её динамика для Камчатского землетрясения 2025 г.

Кроме сильнейших субдукционных землетрясений, одним из проявлений тектонической активности, связанной с субдукционными процессами на Камчатке, является вулканизм. Организованная в окрестности Авачинской группы вулканов система наблюдений, включающая пункты ГНСС позволяет проанализировать взаимосвязь между движениями земной поверхности и проявлениями вулканической активности с целью её дальнейшей параметризации. Для решения этих вопросов за отчётный период начата регулярная обработка измерений локальной сети ГНСС.

В целом, проведённые на этапе 2025 г. работы реализуют процесс формирования системы автоматизированной регулярной обработки данных ГНСС по Камчатки и их геодинамической интерпретации во взаимодействии с Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Сейсмогенный потенциал Камчатки по данным ГНСС

Расположение Камчатки в зоне субдукции Тихоокеанской плиты определяет сочетание разномасштабных геодинамических процессов, проявляющихся в наблюдаемых движениях земной поверхности. По имеющимся данным ГНСС по Камчатке можно сделать вывод об интенсивных деформациях, вызванных процессом погружения Тихоокеанской плиты под Охотоморскую, что проявляется как в горизонтальных, так и вертикальных смещениях поверхности полуострова. Мониторинг этих движений позволяет оценить динамику накопления деформаций, локализацию наиболее интенсивных деформаций, суммарный накопленный сейсмогенный потенциал. Основой для таких оценок являются исходная измерительная информация с наблюдательных пунктов ГНСС в сочетании с моделями тектонических процессов, проявления которых фиксируются по смещениям пунктов ГНСС, и решение соответствующих обратных задач.

Наблюдаемые на поверхности полуострова смещения являются следствием сочетания двух основных факторов: схождения плит (Тихоокеанской и Охотоморской) и распределение сцепления на контакте в зоне субдукции. Методические подходы к оценке количественных характеристик этих факторов подробно описаны в исследованиях предшествующего этапа (2024 г.) выполнения темы НИР и состоят в следующем:

- для вычисления скорости схождения плит и, соответственно, скорости субдукции, используется глобальный набор измерений ГНСС, по которому оценивается кинематика плит в глобальном масштабе (рис. 1) в виде векторов Эйлера, описывающих мгновенное движение жестких сферических сегментов; разность этих векторов для двух смежных плит дает оценку полной скорости взаимного движения плит в произвольной точке их общей границы в виде векторного произведения разностного вектора Эйлера и радиус-вектора точки контакта обеих плит (рис. 2);
- сцепление на контакте характеризуется соотношением скорости обратного смещения на контакте, вызванного трением на шероховатостях, и скорости субдукции, вычисленной из глобальной кинематической модели (см. выше);
- для регуляризации обратной задачи применяются стандартные подходы к сглаживанию решения в сочетании с априорными физическими ограничениями в виде максимально допустимых отклонений векторов смещений на контакте по величине и направлению от субдукционного смещения.

Следует заметить, что глобальная кинематика плит и распределение сцепления на контакте смежных плит представляют собой факторы различных масштабов, глобального

и регионального, соответственно, что предопределяет необходимость использования данных как по всему земному шару, так и по конкретному региону исследований, а вычисление координат и скоростей смещений наблюдательных пунктов ГНСС требует приведения всех расчётов к единой глобальной системе отсчёта. Концептуальные аспекты реализации глобальной системы отсчёта в виде Международной земной системы отсчёта (ITRF) приведены в исследованиях предшествующего этапа (2024 г.) выполнения темы НИР и состоят в следующем. Прецизионная отсчетная основа наземного базирования, применимая для решения геодезических и геодинамических задач различного масштаба, включая глобальный, формируется из распределенной сети опорных пунктов на земной поверхности, координаты которых определены и согласованы между собой и с положением геоцентра. Практическое применение отсчетной основы достигается применением технологий вычисления взаимного положения опорных и определяемых пунктов, что обеспечивает возможность определения координат произвольных пунктов пользователя в системе координат, реализуемой такой отсчетной основой. С учетом тектонических факторов непрерывных изменения взаимного положения физических точек земной поверхности (рис. 2) для поддержания такой согласованности в длительной перспективе требует многолетних начальных наблюдений и выделения опорной сети, состоящей из пунктов со стабильной предсказуемой взаимной кинематикой. В наибольшей степени такому требованию удовлетворяют пункты, расположенные во внутренних платформенных областях литосферных плит, где кинематика земной поверхности определяется движениями литосферных плит, что обуславливает стационарность горизонтальных линейных скоростей каждого такого пункта на протяжении миллионов лет [Стеблов Г.М. и др., 2024].

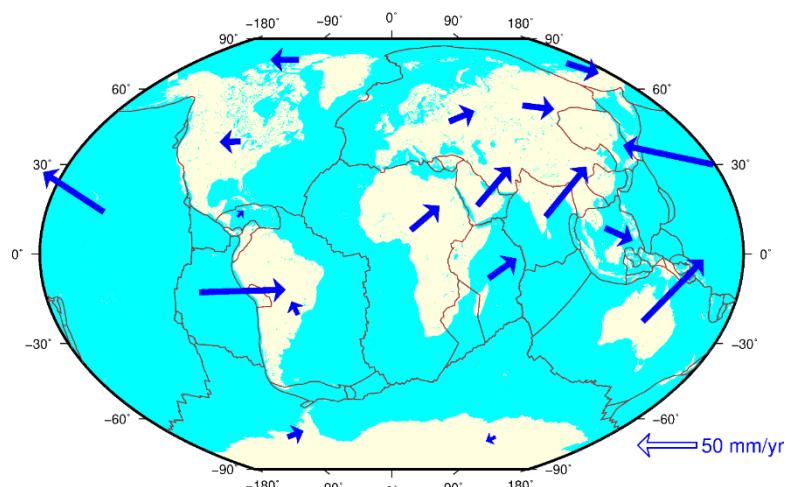


Рисунок 1 – Движения литосферных плит по данным глобальной сети ГНСС

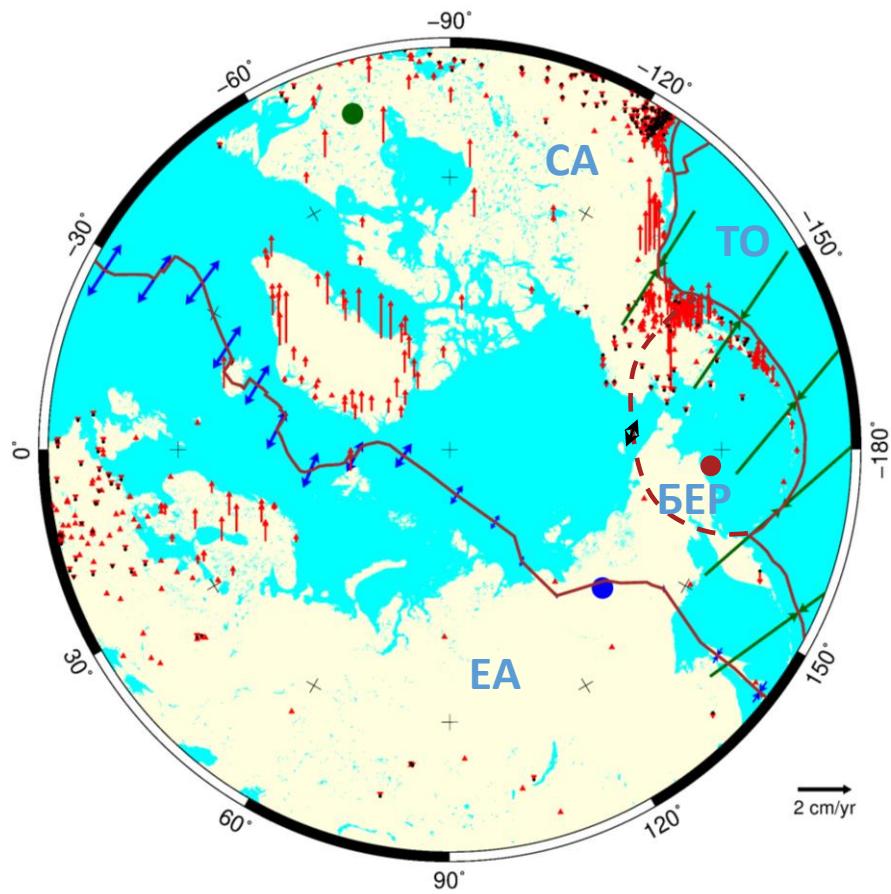


Рисунок 2 – Геодинамическая обстановка на границах литосферных плит по данным глобальной сети ГНСС

Необходимость приведённой концепции построения глобальной геоцентрической отсчётной основы подтверждается, в частности, пространственным распределением статических смещений вследствие Камчатского землетрясения 29.07.2025 (UTC), $M_w=8.7$, распространившимся на тысячи километров от очаговой зоны (рис. 3), по данным геодезической лаборатории Невады [UNR Geodesy Center, 2025]. Аналогичный широкий охват территории, затронутой статическими сейсмическими смещениями, отмечался и для известных сильнейших землетрясений начала 21-го века: Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004, $M_w=9.0$, и землетрясения Тохоку 11.03.2011, $M_w=9.1$. Приведённые примеры мега-землетрясений показывают, что использование региональных или локальных систем отсчёта может приводить к значительным искажениям в оценках сейсмических, предсейсмических и постсейсмических движений вследствие значительных неравномерных смещений опорных точек таких систем.

В соответствии с общей концепцией построения общеземной геоцентрической системы отсчёта и с учётом особенностей методики длиннобазисного высокоточного относительного местоопределения (ВОМО) за отчётный период были проанализированы

имеющиеся данные ГНСС по Камчатке с использованием системы отсчёта, реализуемой совокупным набором глобально распределённых пунктов ГНСС вместе с сетью ФАГС, показанными на рис. 4.



Рисунок 3 – Статические смещения вследствие Камчатского землетрясения 30.07.2025 г., М=8.8, по данным Невадской геодезической обсерватории (<https://geodesy.unr.edu/>)

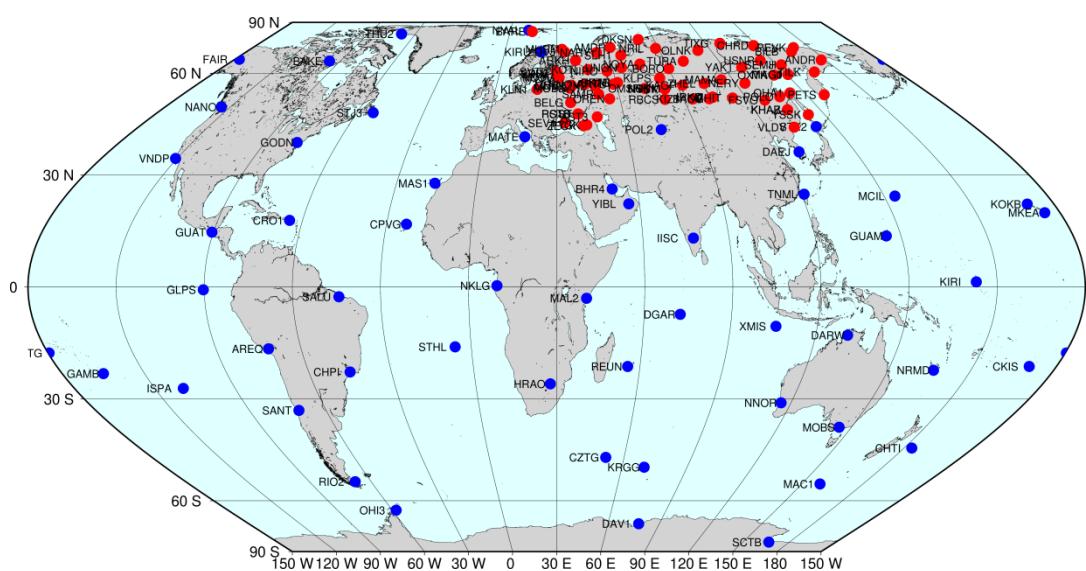


Рисунок 4 – Глобально распределённая сеть пунктов ГНСС, реализующих геоцентрическую отсчетную основу

С этой целью имеющиеся данные с пунктов ГНСС, расположенных на полуострове, были обработаны путём уравнивания исходных спутниковых измерений с Камчатских пунктов и глобально распределённой сети опорных пунктов ГНСС. Вопросы обработки данных ГНСС рассмотрены в отчёте за предшествующий этап (2024 г.) выполнения темы НИР, ниже приведены ключевые аспекты этих вопросов.

Для обработки данных ГНСС на определяемых пунктах, используется информация, необходимая для высокоточного относительного местоопределения (ВОМО), которая включает: первичные радионавигационные измерения на опорных пунктах ГНСС, синхронные с измерениями на определяемых пунктах; оценки координат опорных пунктов ГНСС на период наблюдений; эфемеридно-временную и другую сопроводительную информацию; коэффициенты корреляции между ними. Задача местоопределения наблюдательных пунктов в этом случае сводится к решению уравнений, связывающих синхронные спутниковые радиодальномерные отсчеты на определяемых и опорных пунктах с разностями координат этих пунктов. Такой подход реализует фильтрацию пространственно-коррелированных помех путем дифференциальной коррекции, что отличает методику ВОМО от методов высокоточных абсолютных местоопределений (ВАМО). Разработанные за последние 3 десятилетия специализированные программные пакеты обеспечивают эффективную фильтрацию большей части помех, искажающих первичные спутниковые отсчеты:

- задержки радиосигнала в ионизированной и нейтральной части атмосферы,
- погрешности орбитальной эфемеридной информации,
- вариации параметров вращения Земли,
- рассогласование временной шкалы бортовой и наземной аппаратуры,
- целочисленная неопределенность фазовых радиодальномерных измерений,
- многолучевой прием сигнала,
- приливные смещения земной поверхности.

Методика фильтрации помех базируется на моделировании искажающих факторов с известными физическими свойствами, совместном уравнивании параметров искажений с определяемыми координатами, сглаживании несмещенных возмущений путем осреднения во временной области. Применение указанной выше дифференциальной коррекции позволяет дополнительно существенно снизить итоговую погрешность координатных определений и достичь миллиметрового уровня точности [Herring et al, 2016] методом длиннобазисных ВОМО. При этом для каждой пары наземных наблюдательных пунктов ГНСС, как опорных, так и определяемых, возможность совместного уравнивания исходных спутниковых наблюдений на этих пунктах ограничивается расстоянием между

ними, при котором достигается достаточное количество одновременно видимых спутников без потери связи с ними в течение продолжительного интервала времени (4-6 часов), что выполняется при взаимном удалении пунктов до 2-3 тысяч километров.

Из полученных таким образом ежесуточных оценок координат были сформированы временные ряды с целью выделения средних многолетних скоростей смещения наблюдательных пунктов. Пример временного ряда ежесуточных оценок координат для одного из наблюдательных пунктов ГНСС _ES1 (с. Эссо) на Камчатке приведён на рис. 5.

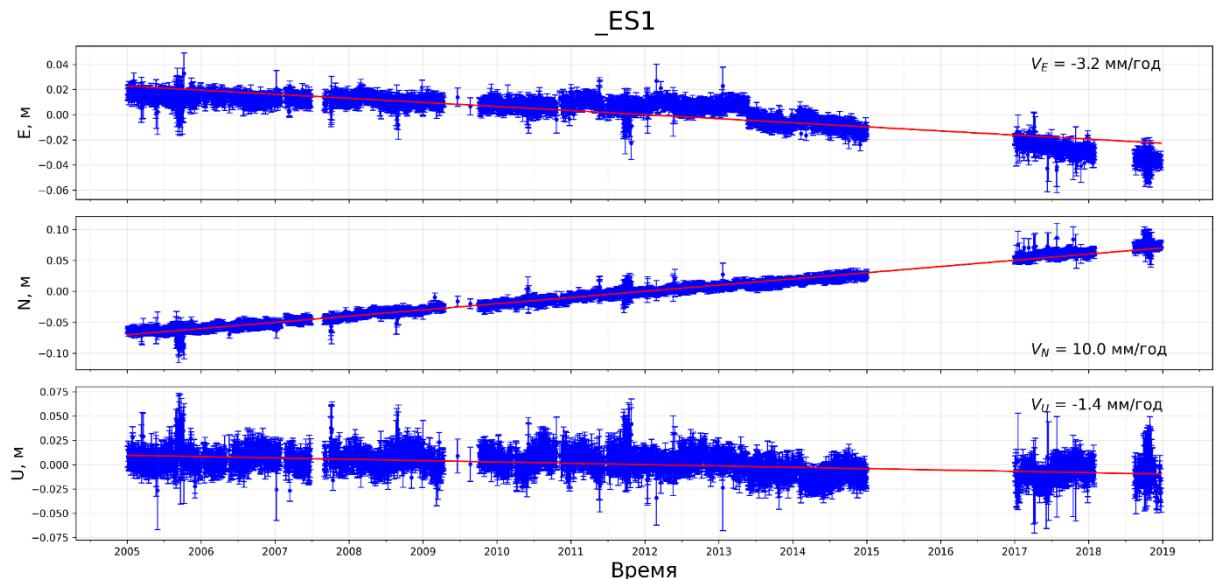


Рисунок 5 – Многолетние смещения пункта ГНСС _ES1 (с. Эссо)

Скорости Камчатских станций ГНСС были оценены с использованием регрессионного анализа временных рядов, описанного в [Nikolaidis, 2002], разработанного для учета сезонных, сейсмических и постсейсмических возмущений вековых наблюдательных пунктов. Такой подход позволяет построить параметрическую регрессионную модель как функцию времени, соответствующую ежедневным координатным решениям каждой станции. В общем случае любая из трех составляющих координат станции может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
 y(t_i) = & a + b t_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \\
 & + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_g^j) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_h^j) + \sum_{j=1}^{n_k} k_j H(t_i - T_k^j) H(T_k^{j+1} - t_i) \cdot t_i + \\
 & + \sum_{j=1}^{n_l} l_j \ln(1 + (t_i - T_l^j)/m_j) H(t_i - T_l^j) + \sum_{j=1}^{n_p} p_j \exp(-(t_i - T_p^j)/r_j) H(t_i - T_p^j) + \varepsilon_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $t_i, N = 1 \dots N$ – моменты наблюдений (оценок координат); a – начальное значение координаты, b – скорость (линейный тренд) смещения пункта; c, d, e, f – представляют годовую и полугодовую периодическую вариацию (сезонного, атмосферного, приливного происхождения); H – ступенчатая функция Хевисайда, g_j – смещения вследствие смены оборудования или программного обеспечения в момент τ_g^j , h_j – сейсмические смещения в момент τ_h^j ; k_j – изменения скорости (линейного тренда) в момент τ_k^j ; логарифмические и экспоненциальные слагаемые представляют постсейсмические переходные процессы (крип и вязкоупругую верхнемантийную релаксацию, соответственно); ε_i – погрешности измерений.

Для оценки сейсмогенного потенциала полуострова Камчатка было оценено распределение сцепления в пределах контактной зоны Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит на основе методики, подробно описанной в отчёте за предшествующий этап (2024 г.) выполнения темы НИР и состоящей в оценке скорости обратного смещения на контакте, вызванного трением на шероховатостях. Соотношение между скоростью обратного смещения и скоростями субдукционных смещений на поверхности устанавливается через функцию Грина, которая является решением уравнения состояния упругой (или вязкоупругой) среды со свободной поверхностью при наличии точечной дислокации. Тогда в общем виде соотношение между скоростью V_{def} смещений в нависающем крыле континентальной плиты и скоростью V_{lock} деформационного смещения ее нижнего края, контактирующего с погружающейся океанской плитой, представляется следующим образом:

$$V_{def}(\mathbf{r}) = \iint_S \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) V_{lock}(\mathbf{r}_s) dS \quad (2)$$

где $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s)$ – функция Грина, \mathbf{r} – вектор положения произвольной точки среды, \mathbf{r}_s – вектор положения дислокации, S – поверхность дислокации.

Скорость обратного смещения находится по наблюдаемым скоростям поверхностных смещений пунктов ГНСС путём минимизации их невязки с модельными скоростями V_{def} из соотношения (2):

$$\min_{V_{lock}(\mathbf{r}_s)} \left\{ \sum_i \left| \iint_S \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) V_{lock}(\mathbf{r}_s) dS - \mathbf{v}_{obs,i} \right|^2 + \lambda \|V_{lock}(\mathbf{r}_s)\|^2 \right\} \quad (3)$$

где

$$\mathbf{v}_{obs,i} = \mathbf{v}_{ITRF} - \boldsymbol{\Omega}_P \times \mathbf{r}_i \quad (4)$$

$\mathbf{v}_{obs,i}$ – скорость смещения i -го наблюдательного пункта ГНСС в точке \mathbf{r}_i относительно жёсткой части плиты, которая получается как разность скорости этого пункта \mathbf{v}_{ITRF} в

геоцентрической системе отсчёта ITRF и расчётной скорости движения плиты $\Omega_p \times \mathbf{r}_i$ в этом пункте по модели глобальной кинематики плиты в ITRF, описываемой вектором Эйлера Ω_p .

В результате сопоставления скорости обратного смещения \mathbf{V}_{lock} со скоростью конвергенции плит по модели их глобальной кинематики в ITRF получается распределение межплитового сцепления вдоль Курило–Камчатской зоны субдукции, которое указывает на то, что наиболее сильное сцепление и накопление напряжений простираются почти вдоль всего побережья Камчатки, начиная с глубин 20-30 км. Исключительно высокое сцепление (80-100%) на большей части межплитной границы способствует быстрому нарастанию упругих напряжений, увеличивая риск землетрясений большой магнитуды. Эта закономерность согласуется с наличием тонкого слоя гидратированных отложений в верхней части зон субдукции, который действует как смазка и облегчает скольжение по неглубокой границе раздела [Сорохтин, Лобковский, 1976].

Рассматривая скорость обратного смещения как дефицит смещений на контакте плит, оценим накопленный дефицит выделения сейсмического момента в виде:

$$M_o^{accum} = \iint_S \mu \mathbf{V}_{lock}(\mathbf{r}_s) T(\mathbf{r}_s) dS \quad (5)$$

где μ – модуль сдвига, $T(\mathbf{r}_s)$ – время накопления напряжений в окрестности точки \mathbf{r}_s контактной поверхности S после разгрузки в ходе последнего сильнейшего землетрясения.

Тогда моментная магнитуда, в соответствии с [Hanks, Kanamori, 1979] вычисляется из скалярного сейсмического момента в виде:

$$M_W^{accum} = (\lg M_o^{accum} - 9.1) / 1.5 \quad (6)$$

Согласно существующим представлениям (например, [Федотов, 1968; Bilek, Lay, 2018]), наиболее сильные землетрясения имеют тенденцию повторяться квазипериодически примерно в одних и тех же сегментах сейсмогенной зоны. Принимая это во внимание и предполагая, что пространственная структура межплитного сцепления остается достаточно стабильной с течением времени, мы оцениваем количество упругой энергии, накопленной на сегодняшний день в очаговых зонах прошлых крупных землетрясений с $M_W \geq 8$. Для этого мы условно разделили исследуемый Камчатский регион на три сегмента, границы которых приближённо соответствуют очаговым зонам сильнейших исторических землетрясений: двух событий 1923 года и Северо-Курильского землетрясения 1952 года (рис. 6).

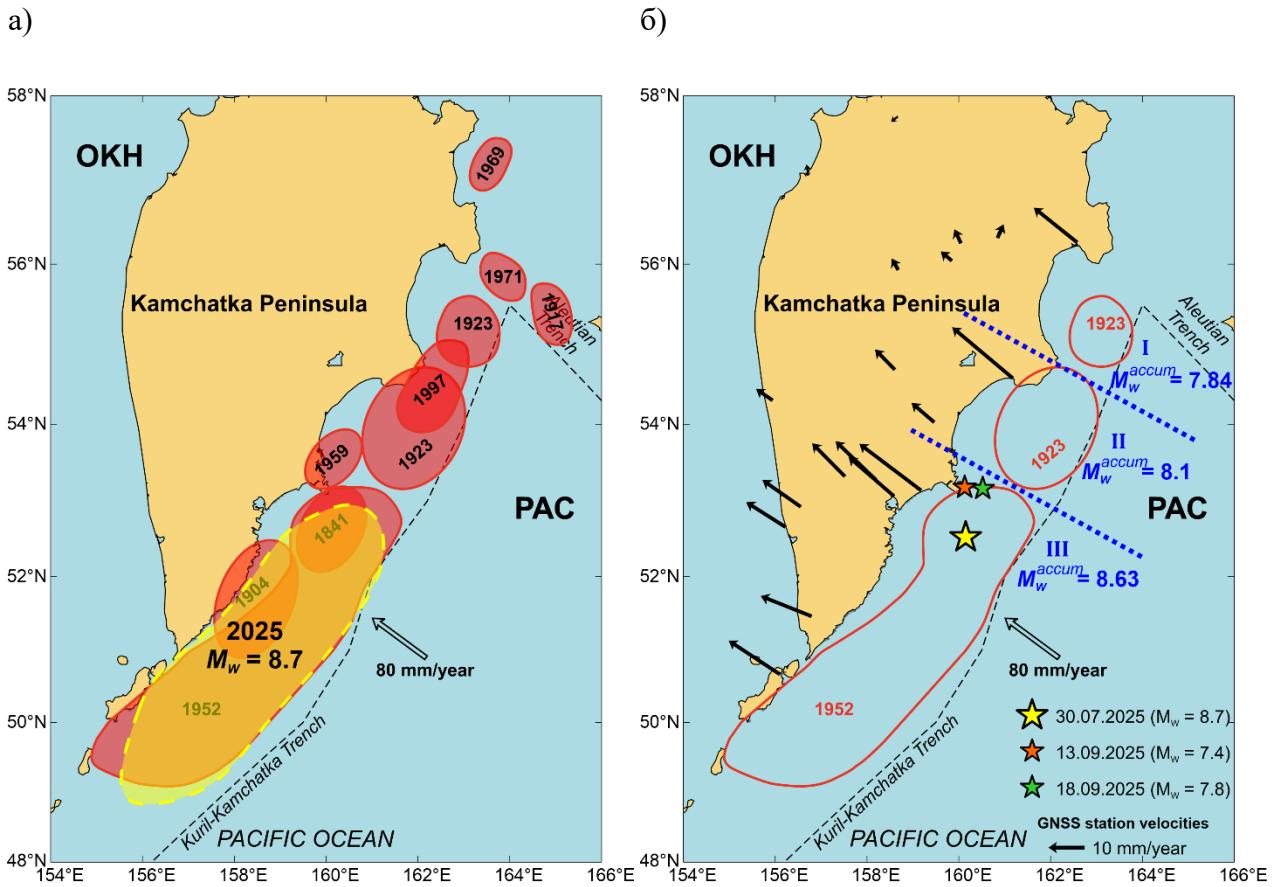


Рисунок 6 – Сейсмичность Камчатки: (а) красными эллипсами указаны очаговые зоны сильнейших исторических землетрясений ($M \geq 7.7$) по [Федотов С.А., Соломатин А.В., 2015], жёлтым штриховым эллипсом указана очаговая зона Камчатского землетрясения 2025 г.; (б) эпицентры сильнейших исторических землетрясений, принятых в расчёт для сегментации зоны субдукции, границы сегментов указаны синими штриховыми линиями, жёлтая звезда – эпицентр главного толчка 30 июля 2025 г., оранжевая и зелёная звезда – два сильнейших афтершока 13 и 19 сентября 2025 г., соответственно. РАС – Тихоокеанская литосферная плита, ОКН – Охотоморская литосферная плита

Сегмент I, расположенный на севере, ассоциируется с землетрясением 13 апреля 1923 года (M_w 7.3–8.2); накопленный к 2025 году скалярный момент с 1923 года, за вычетом частичной разгрузки во время Кроноцкого землетрясения 1997 года (M_w 7.9), составляет $M_o^{accum} = 7.20 \times 10^{20} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($M_W^{accum} = 7.84$). Сегмент II соответствует землетрясению 3 февраля 1923 года (M_w 8.4), накопленный к 2025 году момент (также после вычитания разгрузки в ходе Кроноцкого землетрясения 1997 года.) составляет $M_o^{accum} = 1.25 \times 10^{21} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($M_W^{accum} = 8.1$). Сегмент III, в южной части рассматриваемой области, определяется Северокурильским землетрясением 1952 года (M_w 9.0), в этом сегменте накопленный момент к 2025 году составил $M_o^{accum} = 0.99 \times 10^{22} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($M_W^{accum} = 8.63$). Значительный сейсмогенный потенциал сегмента III зоны субдукции свидетельствует о возможности возникновения в этом сегменте сильного землетрясения, такого как Камчатское в 2025 году. Такой сегментированный подход даёт возможность

пространственно-распределённого оценивания сейсмогенного потенциала для будущих сильнейших землетрясений вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции.

2 Модель очага Камчатского землетрясения 2025 г.

Произошедшее 30 июля 2025 года (по местному времени) у восточного побережья Камчатки мощное землетрясение по своей магнитуде 8.7–8.8 сопоставимо с оценкой сейсмогенного потенциала, накопленного в пределах одного из сегментов Курило-Камчатской зоны субдукции (см. выше сегмент III, M_W^{accum} 8.63), который практически совпал с очаговой зоной данного события и с очаговой зоной Северокурильского землетрясения 1952 года. Из сопоставления магнитуды и очертаний очаговой зоны можно сделать вывод том, что большую часть накопленных упругих напряжений в этом сегменте высвободилась в ходе Камчатского землетрясения 2025 г. Кроме того, в сентябре 2025 года два сильнейших афтершока (13 сентября 2025 года, M_w 7.4 и 19 сентября 2025 года, M_w 7.4) произошли в северной части сегмента III, вблизи Шипунского полуострова, непосредственно вдоль края главного сейсморазрыва 30 июля. Эти афтершоки, вероятно, способствовали дополнительному высвобождению упругих напряжений в северной части главного сейсморазрыва. Однако, если мы предположим, что основные смещения, вызванные сентябрьскими афтершоками, которые произошли в основном вдоль границы между сегментами II и III, в первую очередь затронули сегмент II, то накопленный скалярный сейсмический момент в этом сегменте следует уменьшить с $M_W^{accum} = 1.25 \times 10^{21}$ Н·м приблизительно до $M_W^{accum} \approx 3.91 \times 10^{20}$ Н·м, что соответствует моментной магнитуде M_W^{accum} 7.66. Это указывает на то, что значительная часть ранее сохранявшихся упругих деформаций в сегменте II, вероятно, была высвобождена во время этих афтершоков, что подчеркивает значительную роль афтершоковой активности в перераспределении напряжения вдоль зоны субдукции.

Для построения конечной модели очага Камчатского землетрясения 2025 г. и анализа его динамики имеющиеся данные ГНСС по Камчатке были обработаны в кинематическом режиме относительных местоопределений, который отличается от статического режима высокоточных относительных местоопределений отсутствием осреднения по времени и состоит в уравнивании синхронных спутниковых радиодальномерных отсчётов на определяемых и на опорных пунктах ГНСС отдельно для каждого момента времени. Такие определения содержат большую погрешность из-за менее полного моделирования ошибок измерений, но дают большее разрешение по времени.

Пример временных рядов посекундных оценок смещений для двух наблюдательных пунктов на Камчатке: PETS (г. Петропавловск-Камчатский) и SKCH (п. Сокоч) приведён на рис. 7, на котором хорошо видны статические остаточные смещения и колебательный процесс в ходе рассматриваемого землетрясения.

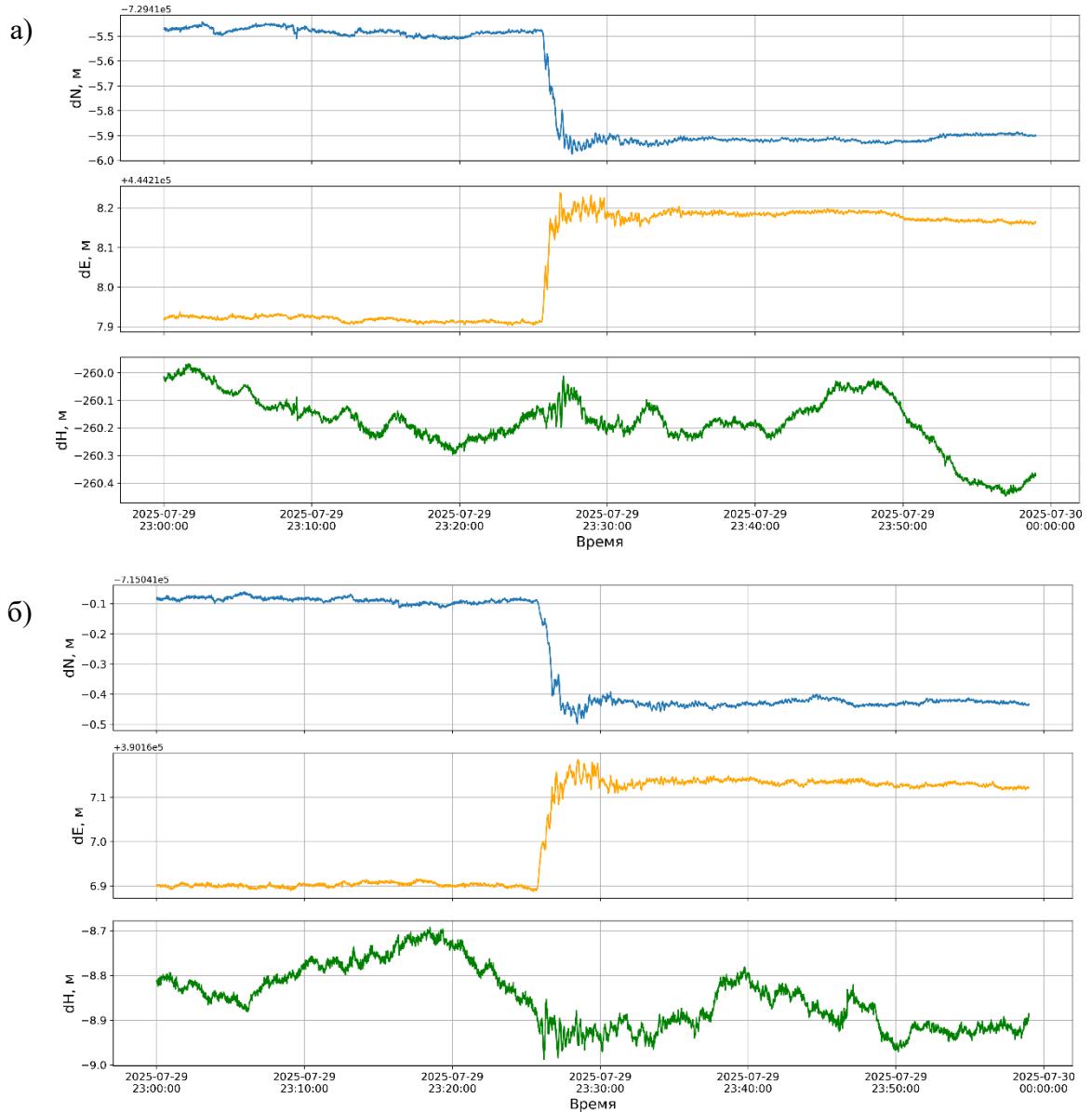


Рисунок 7 – Пример временных рядов смещений (dN – на север, dE – на восток, dH – по вертикали) пунктов ГНСС на Камчатке с посекундным разрешением по времени: (а) PETS (г. Петропавловск-Камчатский), (б) SKCH (п. Сокоч)

Совокупный набор данных, использованных для моделирования очага и динамики развития сейсморазрыва, состоял из 5 станций ГНСС на Камчатке, обеспечивающих непрерывную регистрацию первичных спутниковых измерений с шагом 1 сек и передачу этих измерений в центры обработки в оперативном режиме с наименьшими возможными задержками: KLCH (п. Ключи, п-ов Камчатка), PETS (г. Петропавловск-Камчатский, п-ов

Камчатка), SKCH (п. Сокоч, п-ов Камчатка); SVK1 (г. Северо-Курильск, о-в Парамушир), ITRP (о-в Итуруп). Данные по перечисленным станциям ГНСС предоставлены ОА «Прин» и ППК «Роскадастр». Расположение перечисленных пунктов показано на рис. 8.

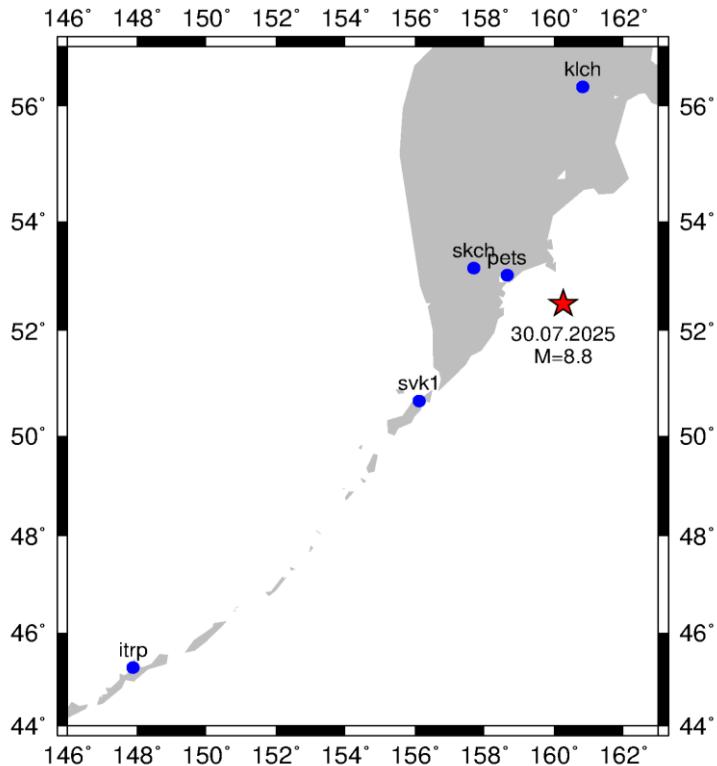


Рисунок 8 – Расположение непрерывно работающих пунктов ГНСС на полуострове Камчатка и Курильских островах с передачей измерительной информации в режиме реального времени; красная звезда – эпицентр землетрясения 30.07.2025, М 8.8

В результате указанной выше обработки измерений в кинематическом режиме со всех 5 приведённых пунктов ГНСС были построены сводные графики горизонтальных смещений пунктов в едином масштабе с шагом 1 сек, показанные на рис. 9. Выборка из этих смещений с шагом 30 сек отображена на серии карт на рис. 10 в виде синих стрелок.

Используя соотношения, аналогичным описанным выше между скоростями смещений на поверхности и обратных смещений на межплитовом контакте, сейсмические смещения на поверхности выражаются через подвижки в очаге через ту же функцию Грина, что и в (2):

$$\mathbf{u}_{\text{surf}}(\mathbf{r}) = \iint_S \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) \mathbf{U}(\mathbf{r}_s) dS \quad (7)$$

где $\mathbf{u}_{\text{surf}}(\mathbf{r})$ – мгновенное модельное поверхностное смещение в точке \mathbf{r} , $\mathbf{U}(\mathbf{r}_s)$ – подвижка в очаге в точке \mathbf{r}_s . Тогда распределение подвижки в очаге получается из решения обратной задачи путём минимизации невязки между модельными $\mathbf{u}_{\text{surf}}(\mathbf{r})$ и

измеренными $\mathbf{u}_{obs,i}$ поверхностными смещениями с регуляризацией, обеспечивающей гладкость и физическую допустимость:

$$\min_{\mathbf{U}(\mathbf{r}_s)} \left\{ \sum_i \left| \iint_S \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) \mathbf{U}(\mathbf{r}_s) dS - \mathbf{u}_{obs,i} \right|^2 + \lambda \|\mathbf{U}(\mathbf{r}_s)\|^2 \right\} \quad (8)$$

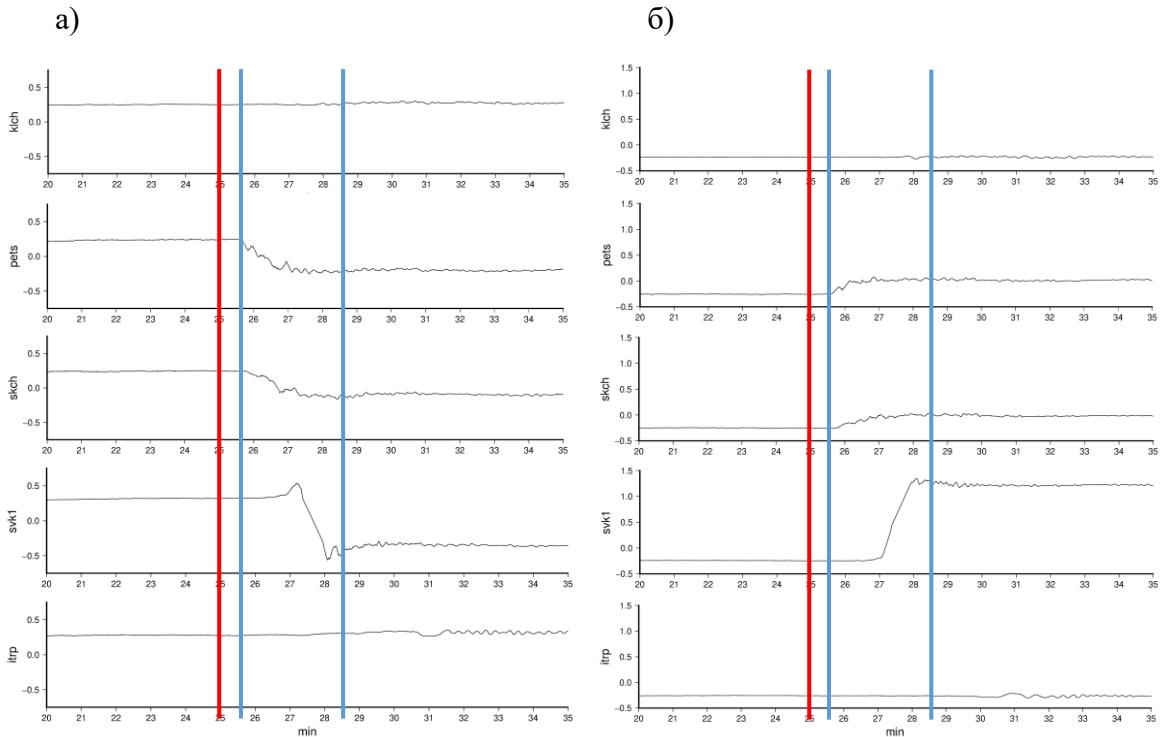


Рисунок 9 – Сводный график горизонтальных смещений непрерывно работающих пунктов ГНСС на полуострове Камчатка и Курильских островах: (а) – северная компонента, (б) – восточная компонента. Красная линия – время в эпицентре, синие линии – интервал распространения статических смещений

Результаты выполненной таким образом оценки распределения смещений в очаге для выборки смещений пунктов ГНСС с шагом 30 сек также показаны на серии карт на рис. ... в виде проекции на земную поверхность наклонной поверхности сейсморазрыва в контурах с оттенками красного цвета, соответствующими величине смещений в очаге.

Анализируя рисунки 9 и 10, можно оценить направление и скорость распространения сейсморазрыва. На ближайшей к эпицентру станции PETS начало смещений отмечается, примерно, через 30 сек после времени в эпицентре (красная линия на рис. 11), на самой удалённой от эпицентра станции SVK1 окончание смещений отмечается, примерно, через 180 сек после начала на пункте PETS.

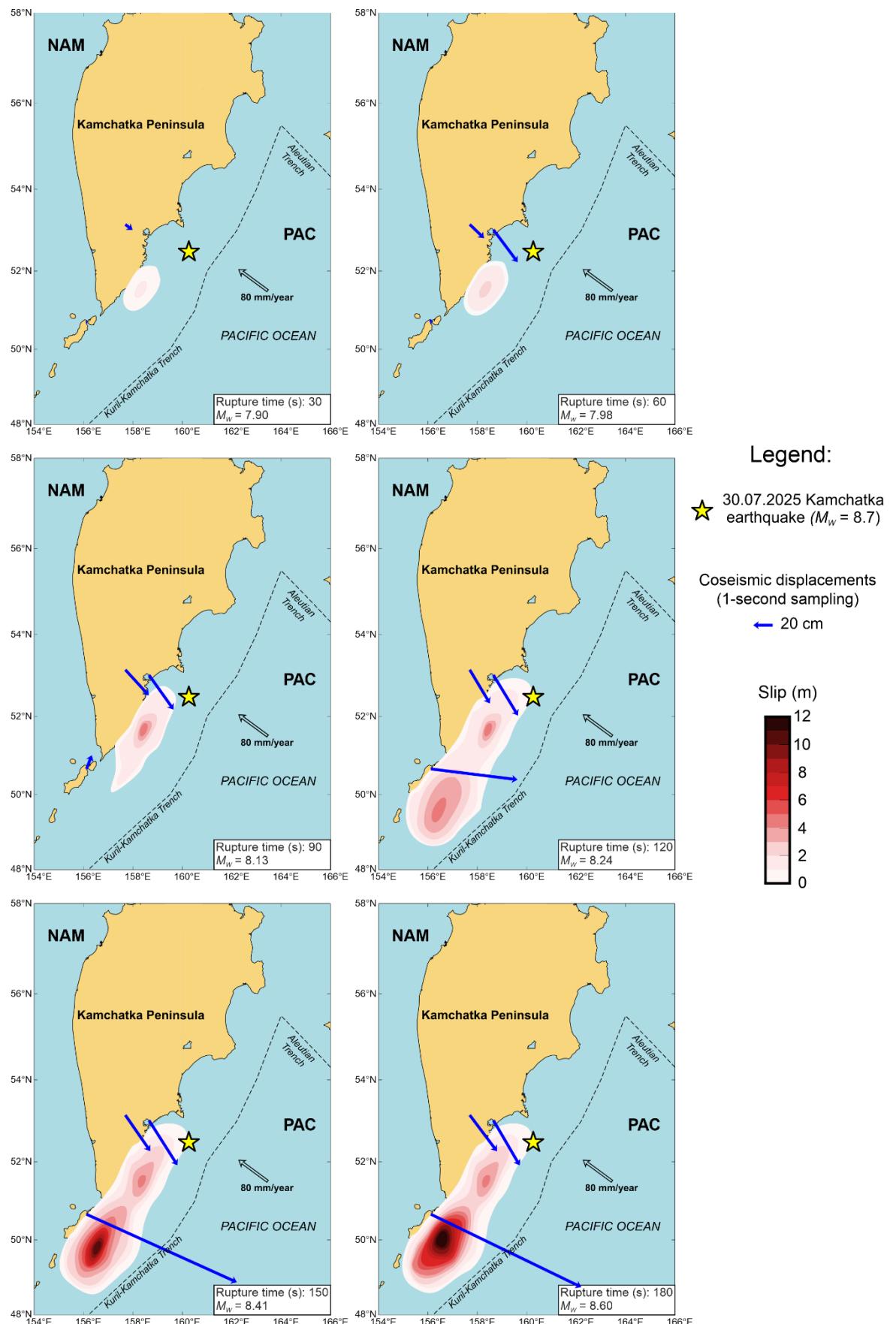


Рисунок 10 – распространение смещений, вызванных Камчатским землетрясением 30.07.2025 (29.07.2025 по UTC), $M = 8.8$; жёлтая звезда – эпицентр землетрясения 30.07.2025, $M = 8.8$; синие стрелки – смещения пунктов ГНСС

Делая из приведённого сопоставления вывод о направлении распространения сейсморазрыва с севера на юг, от Петропавловска-Камчатского до Северо-Курильска, при расстоянии, примерно, 300 км между этими городами, можно оценить скорость распространения сейсморазрыва на уровне 1.67 км/сек, что в 2 раза медленнее, чем средняя скорость поперечной волны в верхней коре. Аналогичные оценки скорости и направления распространения сейсморазрыва подтверждаются последовательностью изолиний величины смещений в очаге на серии карт на рис. 10, демонстрирующих начало разрыва в северной части очаговой зоны и его распространение на юг, в сторону Курильских островов, с формированием второго локального максимума смещений в южной части очаговой зоны величиной около 12 м. При этом второй локальный максимум, заметно превосходит первый и отстоит от него, примерно, на 300 км, и также формируется в течение, примерно, 180 сек после возникновения сейсморазрыва в окрестности первого локального максимума.

Корректность приведённых оценок подтверждается их согласием с моделями динамики развития очага (рис. 11 и 12), независимо построенными по сейсмическим данным и опубликованными Геологической Службой США (USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60>).

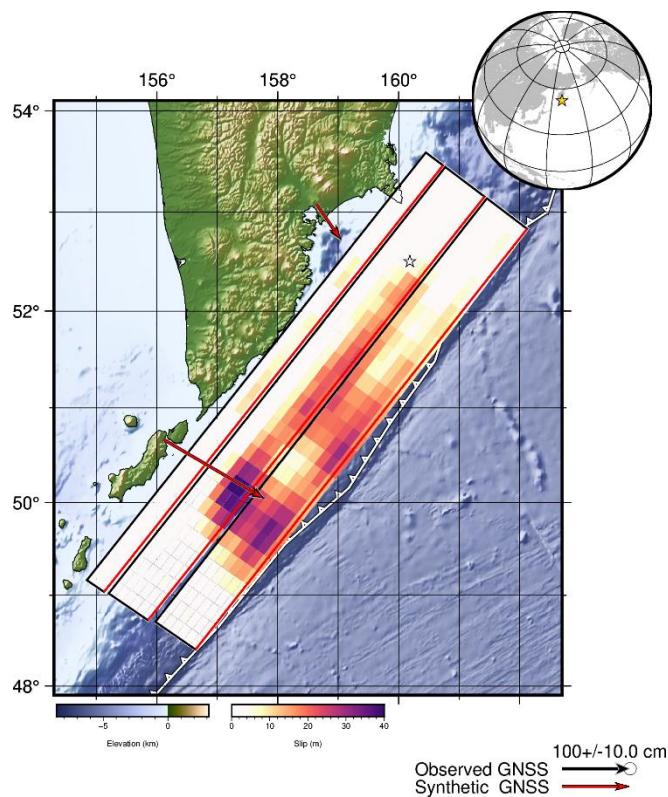


Рисунок 11 – Конечная модель очага Камчатского землетрясения 2025 г. по данным USGS (проекция на земную поверхность)

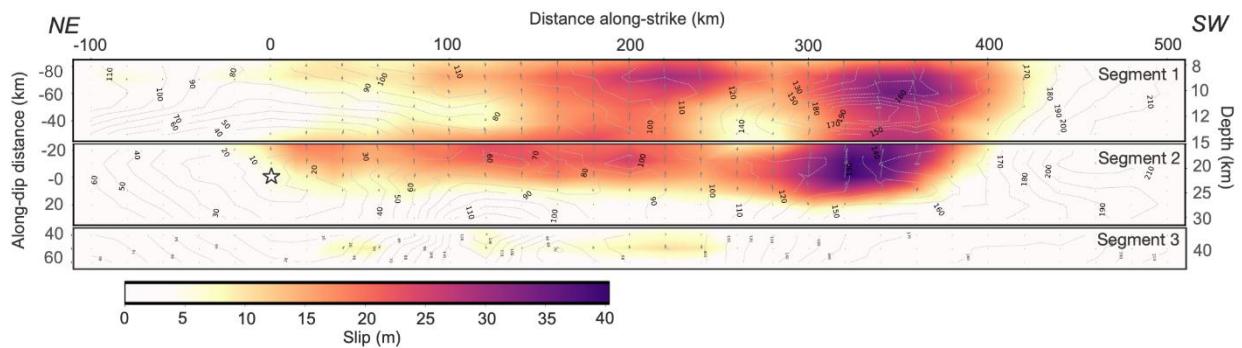


Рисунок 12 – Динамика распространения сейсморазрыва Камчатского землетрясения 2025 г. по данным USGS (профиль по простиранию и падению)

Отмеченный замедленный характер развития очага, возможно, является наиболее вероятным объяснением относительно низкой интенсивности воздействий от Камчатского землетрясения 2025 г.: зафиксированные уровни сотрясений, разрушения, цунами и т.д. представляются заметно более низкими, чем ожидалось, исходя из магнитуды события 8.8. В частности, высота волн цунами, порождённых данным землетрясением, достигала 4–5 м вследствие распределения смещений морского дна по более продолжительному интервалу времени, что, в свою очередь, сократило импульсное воздействие на водяную толщу. В противоположность этому, историческое землетрясение 1952 г. (M_w 9.0–9.2), которое сопровождалось более быстрым распространением сейсморазрыва с большей величиной подвижки по разрыву, породило волны цунами высотой до 4–13 м вдоль части Камчатского побережья и высотой до 15–18 м на Курильских островах [Gusiakov, 2016].

Следует отметить различия в оценках сейсмических смещений и соответствующих моделей очага, построенных по данным с разрешением по времени 1 сек, обработанным в кинематическом режиме, и по данным с суточным осреднением, обработанным в статическом режиме (см. выше). Как видно на рис. 13, посуточное осреднение приводит к завышенным оценкам величины смещений на поверхности и, соответственно, в очаге.

В целом, несмотря на общую согласованность обеих оценок по локализации смещений в очаге с максимумом около 12 м в окрестности о-ва Парамушир, осреднённые оценки дают более высокую величину скалярного сейсмического момента ($M_0 = 1.58 \times 10^{20} \text{Н}\cdot\text{м}$, M_w 8.73) по сравнению с высокочастотными оценками ($M_0 = 1.09 \times 10^{20} \text{Н}\cdot\text{м}$, M_w 8.62).

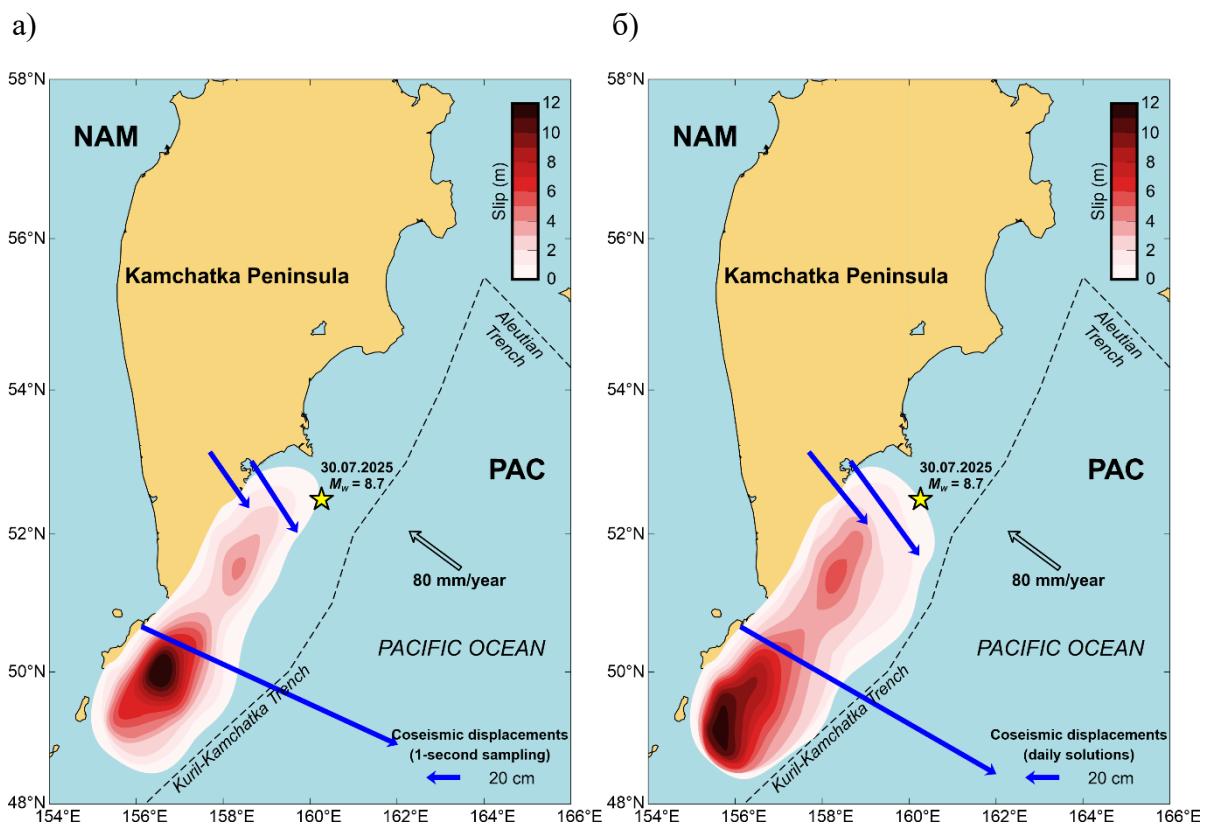


Рисунок 13 – Конечная модель очага 30 июля 2025 г.: (а) распределение подвижки в очаге по данным ГНСС в кинематическом режиме обработки с шагом 1 сек, (б) распределение подвижки в очаге по данным ГНСС в статическом режиме обработки с осреднением 1 сутки; PAC – Тихоокеанская литосферная плита, NAM – Североамериканская литосферная плита

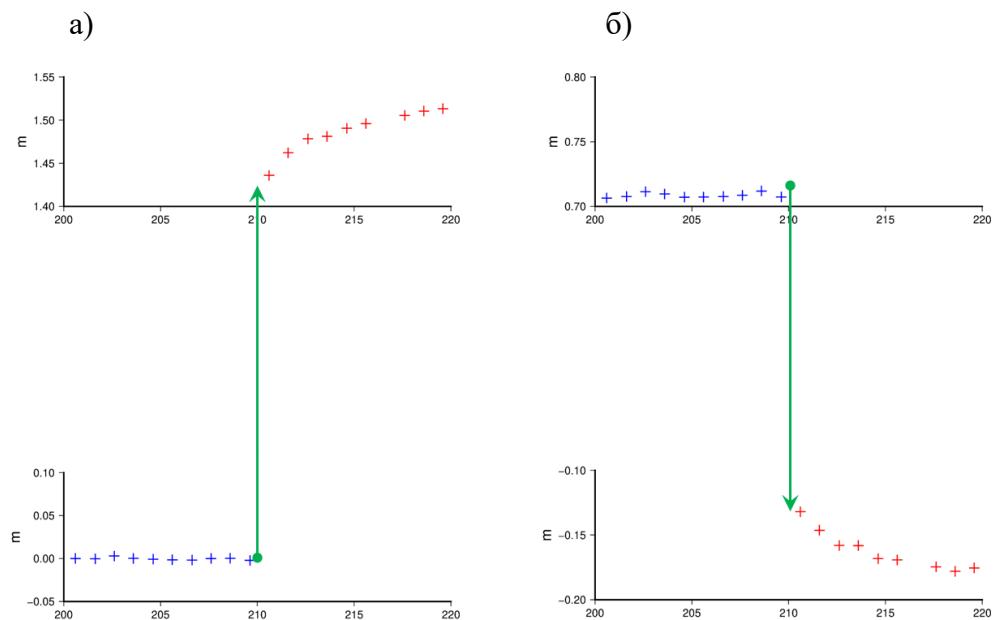


Рисунок 14 – Смещения пункта SVK1 (Северо-Курильск): а) в направлении Запад-Восток, б) в направлении Юг-Север; синий цвет – предсейсмические смещения, зелёный – сейсмические смещения, красный – постсейсмические смещения

Указанные различия объясняются тем, что высокочастотные оценки (с разрешением 1 сек) отражают непосредственно развитие сейсмопрорыва, в то время как поступочно осреднённые оценки дополнительно к сейсмическим смещениям включают также и начальные постсейсмические движения (см. рис. 14). Сравнение двух приведённых оценок на рис. 14 показывает влияние разрешения по времени на точность моделирования смещений.

В целом, проведённый анализ подчёркивает актуальность спутникового геодезического мониторинга такого сейсмоактивного региона как Камчатка для оценки сейсмической опасности.

3 Система спутникового геодезического мониторинга вулканической и сейсмической активности на Камчатке

В рамках проработки методических и практических вопросов развития системы спутникового геодезического мониторинга вулканической и сейсмической активности на Камчатке за отчётный период были практически реализованы основные компоненты этой системы, рассмотренные концептуально на предыдущем этапе (2024 г.) выполнения темы НИР. Основные компоненты системы включали:

- сеть пунктов формирования исходных данных (ПФИД), состоящую из наблюдательных пунктов, оснащенных аппаратурой ГНСС и каналами управления и передачи измерительной информации;
- региональный (Камчатский) центр сбора, архивирования и обработки исходных данных;
- континентальный центр формирования отсчетной основы и обработки (уравнивания) исходных данных;
- каналы обмена исходной измерительной информацией и результатами ее обработки.

По организованным двухсторонним каналам обмена данными между ИТПЗ РАН и Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН по стандартным протоколам передачи информации между серверами обеих организаций в ИТПЗ РАН поступили исходные измерения по 8 станциям ГНСС Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, расположенным в окрестности Авачинской группы вулканов: APC1, AVCH, KMSH, KZLS, MYAK, PETR, RADZ, SPNS. Как можно видеть на карте расположения пунктов ГНСС в окрестности Авачинской группы вулканов (рис. 15), два пункта установлены в непосредственной близости от сопок вулканов, остальные пункты располагаются в различных направлениях, на разном удалении от сопок. В целом, указанное расположение обеспечивает возможность

мониторинга движений земной поверхности в окрестности вулканов с целью выявления пространственно-временных вариаций в этих движениях в связи с проявлениями активности изучаемых вулканов.

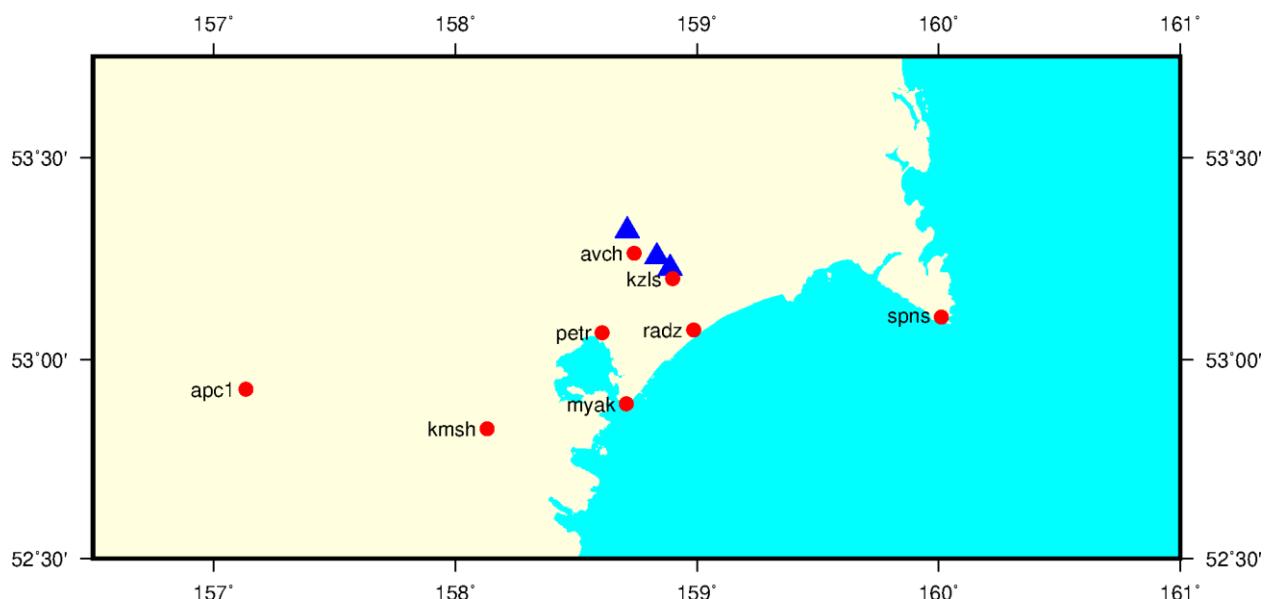


Рисунок 15 – Расположение пунктов ГНСС в окрестности Авачинской группы вулканов: красные круги – пункты ГНСС; синие треугольники – вулканы: Корякский, Авачинский, Козельский (с северо-запада на юго-восток)

Исходные спутниковые измерения за 2025 г. по всем 8 наблюдательным пунктам были обработаны в статическом режиме высокоточных относительных местоопределений (ВОМО) с посutoчным осреднением с привязкой к земной геоцентрической отсчётной основе ITRF (см. подробности обработки выше в разд. 1, 2). Результаты обработки в виде временных рядов смещений пунктов ГНСС приведены на графиках в Приложении 1. В дальнейшем по этим материалам планируется выполнить расчёт латеральных деформаций, их вариаций по времени и сопоставить пространственно-временные вариации латеральных деформаций и вертикальными движениями. Сочетание латеральных деформаций и вертикальных движений планируется далее соотнести с данными о вулканической активности и проанализировать их взаимосвязь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проводимые по теме НИР в 2025 г., состояли в практической реализации вопросов изучения тектонической активности Камчатки по данным ГНСС и включали: оценки сейсмогенного потенциала Камчатки по данным ГНСС, моделирование очага Камчатского землетрясения 2025 г., М 8.8, и сопоставление указанных оценок и моделей, а также вопросы организации системы мониторинга активности Авачинской группы вулканов.

Пространственное распределение статических смещений вследствие Камчатского землетрясения 29.07.2025 (UTC), М 8.8, отмеченных в тысячах километров от очаговой зоны, подтвердило необходимость применения глобальной геоцентрической отсчётной основы геодинамического назначения, концепция которой прорабатывалась на предшествующем этапе (2024 г.) выполнения темы НИР.

Сопоставление оценок сейсмогенного потенциала Камчатки и моделей очага Камчатского землетрясения показало перспективность мониторинга дефицита выделения сейсмического момента по данным ГНСС для оценки сейсмической опасности.

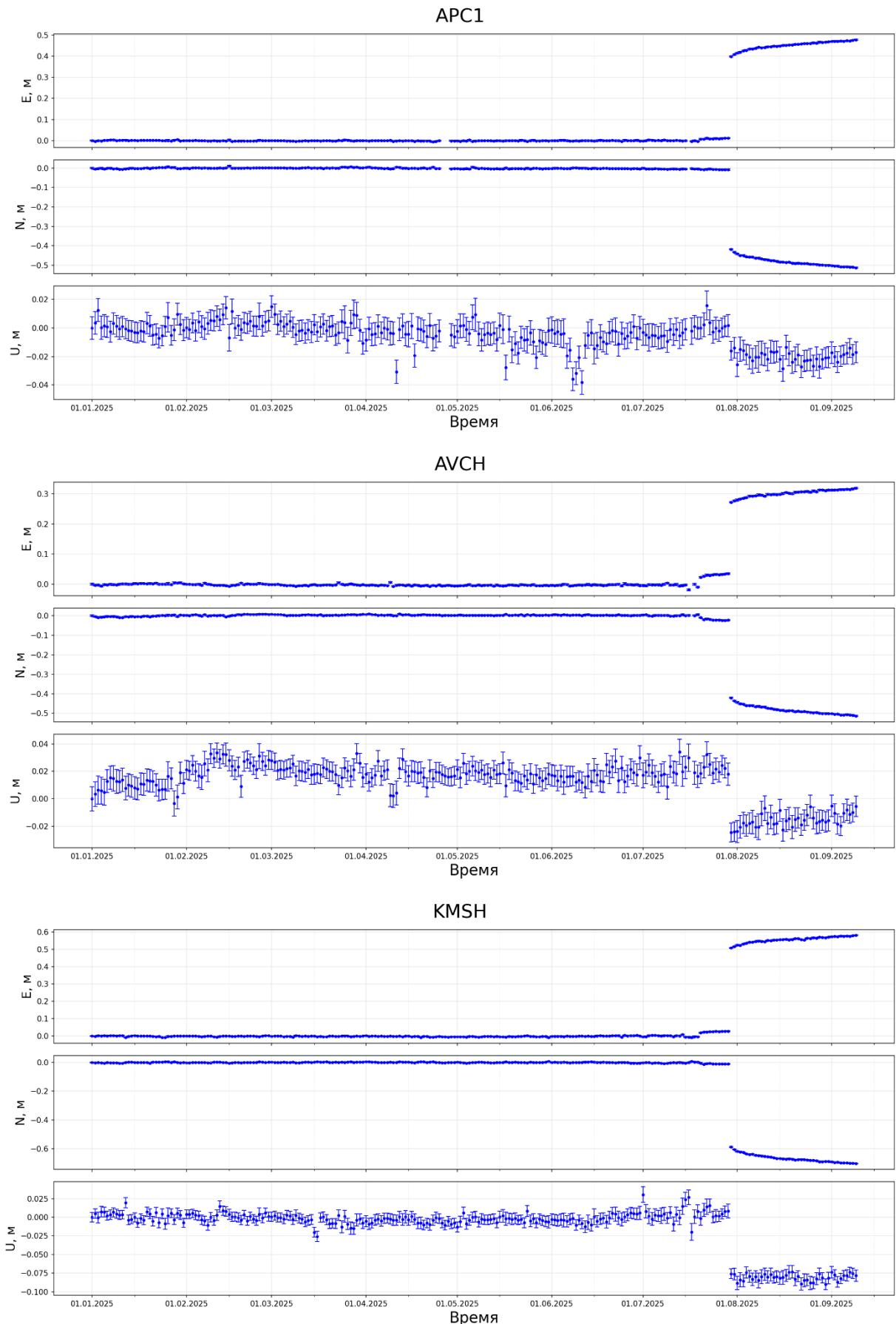
По результатам моделирования очага Камчатского землетрясения и его динамики выявлен замедленный характер формирования сейморазыма, что, возможно, является наиболее вероятным объяснением относительно низкой интенсивности воздействий от Камчатского землетрясения 2025 г.: зафиксированные уровни сотрясений, разрушения, цунами и т.д. представляются заметно более низкими, чем ожидалось, исходя из магнитуды события 8.8.

Организована обработка исходных спутниковых измерений по наблюдательным пунктам в окрестности Авачинской группы вулканов в статическом режиме высокоточных относительных местоопределений (ВОМО) с привязкой к земной геоцентрической отсчётной основе ITRF. Формируемые таким образом материалы послужат в дальнейшем основой для расчёта латеральных деформаций, анализа их вариаций по времени вместе с вертикальными движениями и сопоставления с данными о вулканической активности с целью выявления об их взаимосвязи.

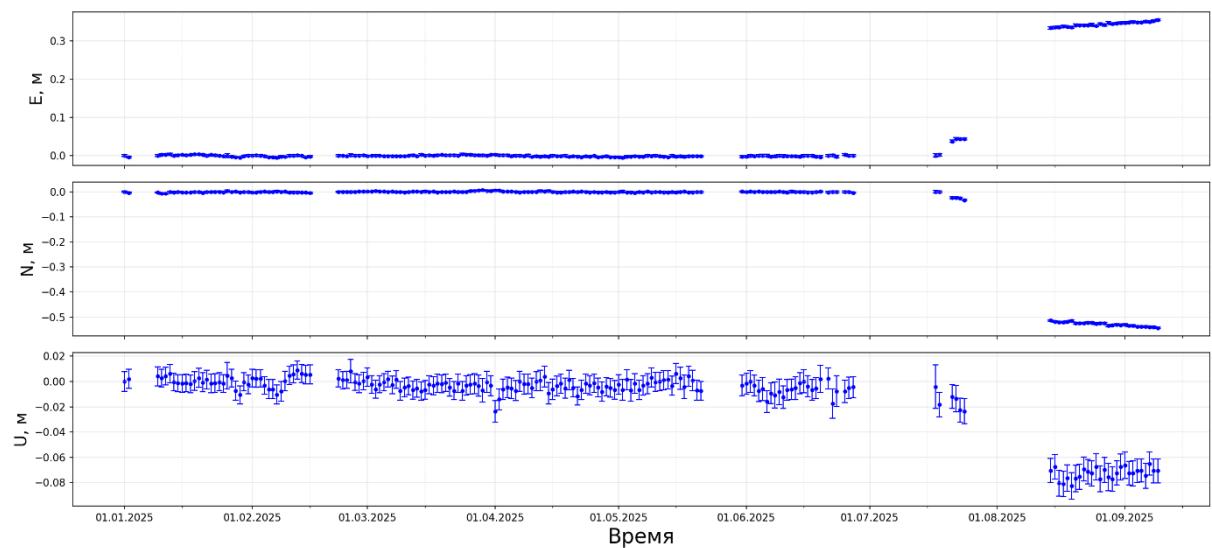
В целом, проведённые на этапе 2025 г. работы позволяют перейти на последующих этапах к автоматизированной регулярной обработке данных ГНСС Камчатки и их геодинамической интерпретации во взаимодействии с Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

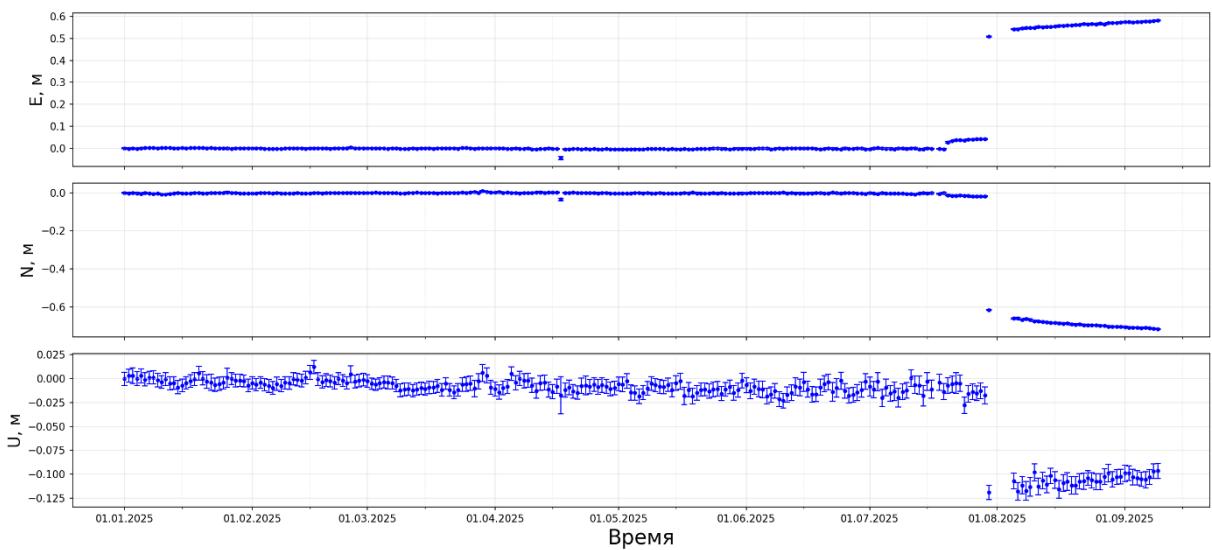
Смещения пунктов ГНСС Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за 2025 г.



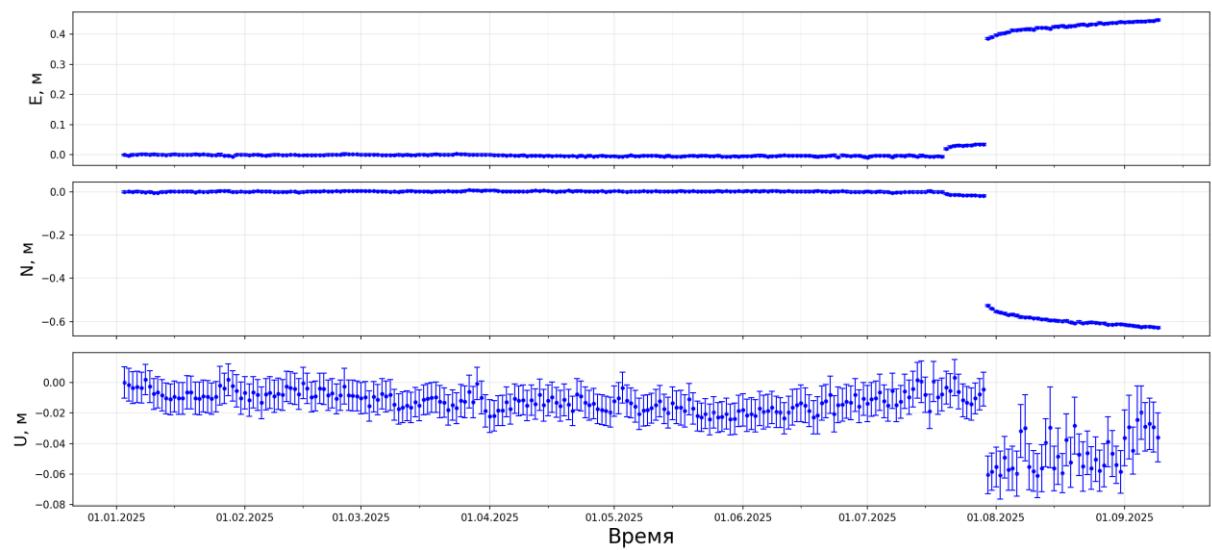
KZLS



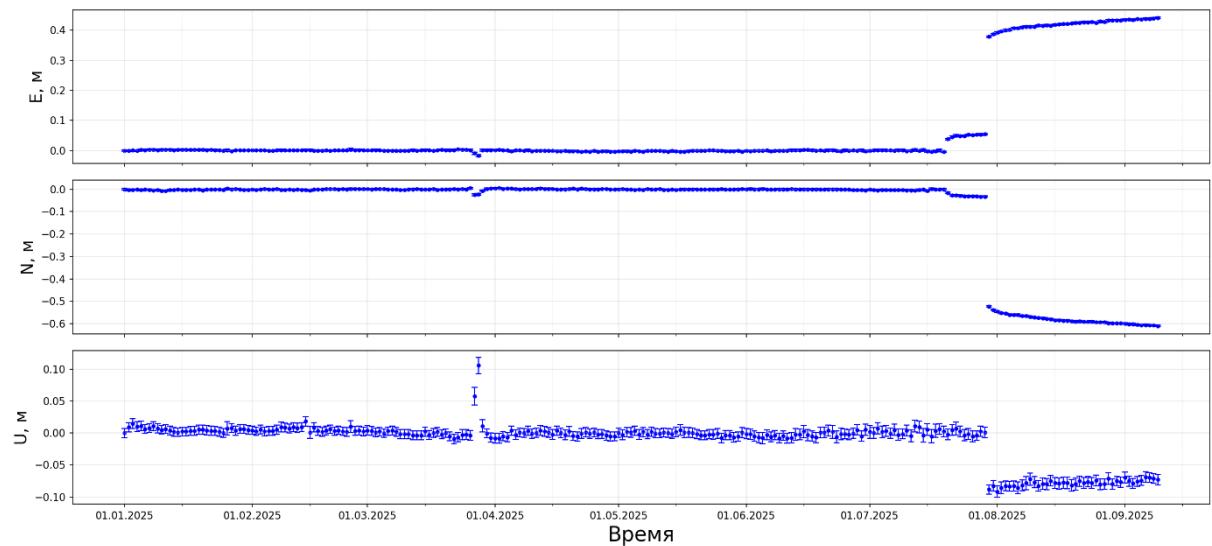
MYAK



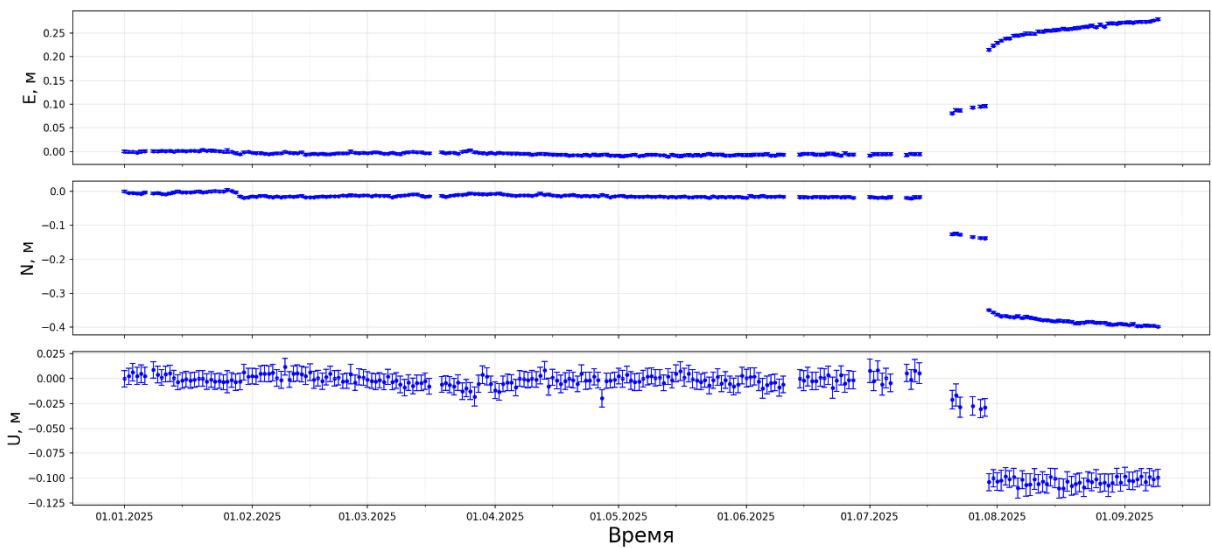
PETR



RADZ



SPNS



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вдовин В.С., Рублев А.С. Оценка смещений станций ГНСС в зоне землетрясений на Камчатке 30.07.2025 и 19.09.2025 // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции / г. Москва, (22–23 октября 2025 г.). — М.: ИТПЗ РАН. — 2025. — С.28-31.
2. Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Цуканова Е.С., Медведев И.П., Сдельникова И.А., Титков Н.Н. Моделирование очага Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. и связанного с ним цунами // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции / г. Москва, (22–23 октября 2025 г.). — М.: ИТПЗ РАН. — 2025. — С. 34-35.
3. Михайлов В.О., Конвисар А.М., Смирнов В.Б., Тимошкина Е.П., Титков Н.Н., Хайретдинов С.А., Чебров Д.В. Модель поверхности разрыва землетрясения на Камчатке 29.07.2025 M 8.8 по данным спутниковой геодезии и интерферометрии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2025. — Т. 525. — № 2. — С. 330–338. — DOI 10.7868/S3034506525120166. — EDN KMYUNI.
4. Сорохтин О.Г., Лобковский Л.И. Механизм затягивания океанических осадков в зону поддвига литосферных плит // Физика Земли. — 1976. — № 5. — С. 3–10.
5. Стеблов Г.М., Шебалин П.Н., Мельник Г.Э. Высокоточные спутниковые геодезические измерения и Геодинамические исследования на территории Северной Евразии: состояние и перспективы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2024. — Т. 518, № 1. — С. 195–204. — DOI 10.31857/S2686739724090209. —EDN DSYTJG.
6. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР, гл. 8. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
7. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с M = 7.7, 7.7 и 8.3 // Вулканология и сейсмология. — 2015. — № 2. — С. 3–19.
8. Bilek S.L., Lay T. Subduction zone megathrust earthquakes // Geosphere. — 2018. — V. 4. — N. 4. — P. 1468–1500. — DOI: [10.1130/GES01608.1](https://doi.org/10.1130/GES01608.1).

9. Gusiakov V.K. Tsunamis on the Russian Pacific coast: history and current situation // Russian Geology and Geophysics. — 2016. — V. 57 — P. 1259–1268. — DOI: 10.1016/j.rgg.2016.08.011.
10. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 1979. — V. 84. — №B5. — P. 2348–2350.
11. Herring T.A., Melbourne T.I., Murray M.H., Floyd M.A., Szeliga W.M., King R.W., Phillips D.A., Puskas C.M., Santillan M., Wang L. Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products // Reviews of Geophysics. — 2016. — V.54. — №.4. — P. 759–808.
12. Nikolaidis R. Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System: Ph.D. Thesis. University of California, San Diego, 2002. — 305 p.
13. Sobisevich A.L., Steblov G.M., Agibalov A.O., Sentsov A.A., Balashov G.R., Zaitsev V.A., Zykov D.S., Makeev V.M., Mayakin A.T., Perederin V.P., Perederin F.V., Poleshchuk A.V., Ruzaykin A.I., Kholodkov K.I. The Interrelation of Morphometric Parameters of Relief and Seismicity of Sakhalin Island // Moscow University Geology Bulletin. — 2025. — V. 80. — №1. — P. 28-37. DOI: [10.3103/S0145875225700139](https://doi.org/10.3103/S0145875225700139).
14. UNR Geodesy Center : офиц. сайт / University of Nevada, Reno. — URL: <https://geodesy.unr.edu/> (дата обращения: 15.12.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Публикации по теме НИР, изданные в 2025 г.

1) Публикации в российских и международных журналах, входящих в Web of Science, Scopus, ядро РИНЦ:

1. Михайлов В.О., Смирнов В.Б., Тимошкина Е.П., Стеблов Г.М. Геодинамические проявления сейсмического процесса в области Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. // Физика Земли. — 2025. — №4. — С. 63-79.
DOI: [10.31857/S0002333725040058](https://doi.org/10.31857/S0002333725040058)

2. Sobisevich A.L., Steblov G.M., Agibalov A.O., Sentsov A.A., Balashov G.R., Zaitsev V.A., Zykov D.S., Makeev V.M., Mayakin A.T., Perederin V.P., Perederin F.V., Poleshchuk A.V., Ruzaykin A.I., Kholodkov K.I. The Interrelation of Morphometric Parameters of Relief and Seismicity of Sakhalin Island // Moscow University Geology Bulletin. — 2025. — V. 80. — №1. — P. 28-37. DOI:[10.3103/S0145875225700139](https://doi.org/10.3103/S0145875225700139)

2) Прочие публикации по теме НИР:

1. Вдовин В.С. Оценка состояния и переуравнивание геодезических сетей после землетрясений // XIV Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем», 26-28 августа 2025 года, Казань. Программа. Тезисы и доклады. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2025. С. 8-15.

2. Вдовин В.С., Рублев А.С. Оценка смещений станций ГНСС в зоне землетрясений на Камчатке 30.07.2025 и 19.09.2025 // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции / г. Москва, (22–23 октября 2025 г.). — М.: ИТПЗ РАН. — 2025. — С.28-31.

3. Вдовин В.С., Аникеева И.А. Роль современных информационных технологий и системного подхода в фундаментальном и прикладном использовании международной земной системы отсчёта и её отсчётной основы // XIV Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 8–12 сентября 2025 г., Владивосток, Россия: мат. докл. / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2025. С. 43-49.
DOI:[10.62994/DVO.2025.10.48.009](https://doi.org/10.62994/DVO.2025.10.48.009).

4. Игнатьев Д.А., Владимирова И.С. Применение машинного обучения для определения геометрии очагов субдукционных землетрясений // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции / г. Москва, (22–23 октября 2025 г.). — М.: ИТПЗ РАН. — 2025. — С. 72-73.

5. Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Цуканова Е.С., Медведев И.П., Сдельникова И.А., Титков Н.Н. Моделирование очага Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. и связанного с ним цунами // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции / г. Москва, (22–23 октября 2025 г.). — М.: ИТПЗ РАН. — 2025. — С. 34-35.

3) Доклады на конференциях:

1. Стеблов Г.М. Спутниковая геодезия в разномасштабных задачах геодинамики // IV Всероссийская научная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ» ИТПЗ РАН / г. Москва, (22–23 октября 2025) — 22 октября 2025 г. Пленарный доклад. URL: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/conf_2025/2025-ITPZ-Conference-Materials.pdf.

2. Вдовин В.С. Оценка состояния и переуравнивание геодезических сетей после землетрясений // XIV Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем», 26-28 августа 2025 года, Казань. Программа. Тезисы и доклады. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2025. <https://kazan-ogc.ru/programm>.

3. Вдовин В.С., Аникеева И.А. Роль современных информационных технологий и системного подхода в фундаментальном и прикладном использовании международной земной системы отсчёта и её отсчётной основы // XIV Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 8–12 сентября 2025 г., Владивосток, Россия: мат. докл. / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2025. С. 43-49. DOI:10.62994/DVO.2025.10.48.009.

4. Вдовин В.С., Рублев А.С. Оценка смещений станций ГНСС в зоне землетрясений на Камчатке 30.07.2025 и 19.09.2025 // IV Всероссийская научная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ» ИТПЗ РАН / г. Москва, (22–23 октября 2025) — 23 октября 2025 г.

Стендовый доклад. URL: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/conf_2025/2025-ITPZ-Conference-Materials.pdf.

5. Игнатьев Д.А., Владимира И.С. Применение машинного обучения для определения геометрии очагов субдукционных землетрясений // IV Всероссийская научная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ» ИТПЗ РАН / г. Москва, (22–23 октября 2025) — 22 октября 2025 г. Секционный доклад. URL: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/conf_2025/2025-ITPZ-Conference-Materials.pdf.

6. Владимира И.С., Габсатаров Ю.В., Цуканова Е.С., Медведев И.П., Сдельникова И.А., Титков Н.Н. Моделирование очага Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. и связанного с ним цунами // IV Всероссийская научная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ» ИТПЗ РАН / г. Москва, (22–23 октября 2025) — 23 октября 2025 г. Секционный доклад. URL: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/conf_2025/2025-ITPZ-Conference-Materials.pdf.