

УДК 550.31

ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЧИГНИК НА АЛЯСКЕ 29.07.2021 г. ЧАСТЬ I: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2024 г. А. М. Конвисар^{1,2,*}, В. О. Михайлов¹, В. Б. Смирнов^{2,1}, Е. П. Тимошкина¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

*E-mail: alexkonvisar@gmail.com

Поступила в редакцию 09.02.2024 г.

После доработки 19.02.2024 г.

Принята к публикации 10.03.2024 г.

В работе выполнен анализ постсейсмических процессов, происходивших в области землетрясения Чигник $M_w = 8.2$, произошедшего 29.07.2021 г. С использованием ранее построенной модели поверхности сейсмического разрыва [Конвисар и др., 2023] выполнено моделирование процесса вязкоупругой релаксации, результаты которого показали, что при понижении в расчетах вязкости астеносферы до 10^{18} Па·с скорости смещений можно приблизить к зарегистрированным на береговых пунктах GPS. Но смещения на островах, близких к очаговой области землетрясения, значительно отличаются не только по величине, но и по направлению. В то же время, построенная модель постсейсмического крипа хорошо согласуется с данными о смещениях на пунктах GPS и с картой смещений в направлении на спутник, построенной по данным спутниковой радарной съемки, выполненной с нисходящей орбиты спутника Сентинель-1А. В работе также выполнен анализ временных вариаций гравитационного поля в области землетрясения. Полученная косейсмическая аномалия согласуется с аномалией, рассчитанной по модели поверхности разрыва. Выделить постсейсмическую аномалию пока не удается из-за недостаточно длинной серии гравитационных моделей после землетрясения. Анализ постсейсмических процессов продолжен во второй части этой работы [Смирнов и др., 2024], в которой выполнен сравнительный анализ эволюции во времени постсейсмических смещений различных пунктов GPS и афтершоковой активности, что позволяет сделать заключения о криповой природе постсейсмических процессов в очаговой области землетрясения Чигник.

Ключевые слова: землетрясение Чигник, Аляска, 29.07.2021, поля смещений, GPS, спутниковая радарная интерферометрия, GRACE-FO, постсейсмический крип, вязкоупругая релаксация.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724040026>, EDN: FXIBIM

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии изучения Земли из космоса, в частности глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), спутники, оснащенные радаром с синтезированной апертурой антенны (РСА) и данные о временных вариациях глобального гравитационного поля, в настоящее время поставляемые спутниками GRACE-FO, существенно дополняют наземные наблюдения, позволяют строить детальные модели поверхности сейсмического разрыва и исследовать различные стадии сейсмического цикла.

Для крупных землетрясений в зонах субдукции основными постсейсмическими процессами,

с которыми связаны смещения на земной поверхности, афтершоковый процесс и изменения гравитационного поля, являются постсейсмические смещения (крип) на поверхности сейсмического разрыва и в ее окрестности, и вязкоупругая релаксация напряжений, возникающих в мантии в результате землетрясения. Эти процессы порождают различные поля напряжений и деформаций, поэтому правильная оценка роли различных постсейсмических механизмов важна для прогноза дальнейшего развития сейсмического процесса. Наземные сети наблюдений в зонах субдукции обычно удалены от очаговой области крупных землетрясений, что существенно затрудняет оценку вкладов вязкоупругой релаксации и постсейсмического крипа в постсейсмические процессы.

В данной статье приведены сравнительные оценки роли сейсмического крипа и вязкоупругой релаксации в постсейсмических процессах в области крупного ($M_w = 8.2$) землетрясения Чигник, которое произошло 29.07.2021 г. у побережья полуострова Аляска, США.

Ранее в статье [Конвисар и др., 2023], мы представили модель поверхности сейсмического разрыва, полученную на основе временных рядов смещений на пунктах GPS и данных о смещениях земной поверхности, рассчитанных по спутниковым радарным снимкам с восходящих и нисходящих орбит спутников Европейского космического агентства Сентинель-1А и 1В. Эти смещения включают как косейсмические, так и небольшую часть постсейсмических смещений. При построении модели поверхности разрыва и оценке поля смещений на ней использовались решения фокального очага землетрясения из Гарвардского каталога GCMT¹ и решение [Pollitz, 1996], позволяющее рассчитывать деформации и напряжения в объеме и на поверхности сферической, радиально расслоенной планеты в результате смещений на расположенном в ней прямоугольном разрезе.

Ниже мы кратко изложим принцип построения модели косейсмического разрыва и ее параметры, сопоставим рассчитанную по этой модели гравитационную аномалию с данными о косейсмических вариациях гравитационного поля по глобальным моделям спутников GRACE-FO. Далее будут приведены результаты моделирования процесса постсейсмической вязкоупругой релаксации напряжений и сопоставление рассчитанных полей смещений с данными GPS, а также результаты моделирования процесса постсейсмического крипа, выполненного с использованием данных GPS и РСА-интерферометрии. В заключение приведена интерпретация и обсуждение полученных результатов.

МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА

Напомним, что землетрясение Чигник произошло в Алеутской зоне субдукции, в которой Тихоокеанская плита погружается под Северо-Американскую со средней скоростью 6–7 см/год [Freymueller et al., 2008; Argus et al., 2011]. Вдоль восточной части Алеутской островной дуги регулярно происходят сильные землетрясения, но землетрясение Чигник было сильнейшим за последние 58 лет. Оно произошло

29.07.2021 г., а его эпицентр, по данным Геологической службы США (USGS)², имел координаты 55.364° с.ш. 157.888° з.д. (рис. 1).

Ранее в районе землетрясения Чигник уже было зафиксировано несколько крупных событий ($M = 8.2$ в 1938 г., $M = 7.8$ в 2020 г.), а восточнее располагается очаговая зона гигантского Великого Аляскинского землетрясения 1964 г. с магнитудой $M = 9.2$ (рис. 1) [Suito, Freymueller, 2009; Ali, Freed, 2010]. Коэффициент сцепления плит, оцениваемый по данным GPS, существенно меняется вдоль восточной части Алеутской дуги [Li, Freymueller, 2018]. Он равен почти единице (полное сцепление) в области Великого Аляскинского землетрясения, западнее, в области землетрясения Чигник, он снижается до 0.5–0.6 и далее на запад становится менее 0.2. В работах [Cross, Freymueller, 2008; Drooff, Freymueller, 2021] на основе данных о средней скорости сближения плит и смещений на пунктах GPS сделан вывод о том, что со времени последнего сильного землетрясения 1938 г. $M = 8.2$ дефицит смещений в районе землетрясения Чигник мог достичь 5 м. Западнее очаговой области землетрясения Чигник, где расположена так называемая Шумагинская сейсмическая брешь, и где коэффициент сцепления невелик, с начала XX-го века и до 2020 г. не наблюдалось сильных землетрясений [Davies et al., 1981; Ye et al., 2021]. Вопрос о соотношении очаговой области и области постсейсмического крипа землетрясения Чигник с областью Шумагинской бреши и Великого Аляскинского землетрясения имеет важное значение для оценки сейсмического потенциала всего региона.

Естественно, что для такого события, как Чигник, был построен ряд моделей сейсмического разрыва. Модель [Elliott et al., 2022] основана на данных спутниковой РСА-интерферометрии, но при ее построении использовались только небольшие участки интерферограмм с хорошей когерентностью. Модель, опубликованная на сайте Геологической службы США, основана на анализе записей сейсмических широкополосных станций. А модели из работ [Liu et al., 2022; Ye et al., 2022] построены по сейсмологическим и GPS данным, во второй работе также использованы данные о цунами.

Для определения параметров поля смещений в работе [Конвисар и др., 2023] мы использовали 16 радарных снимков со спутников Сентинель-1А и 1В (С-диапазон, длина волны $\lambda = 5.6$ см),

¹ <https://www.globalcmt.org/>

² <https://earthquake.usgs.gov/>

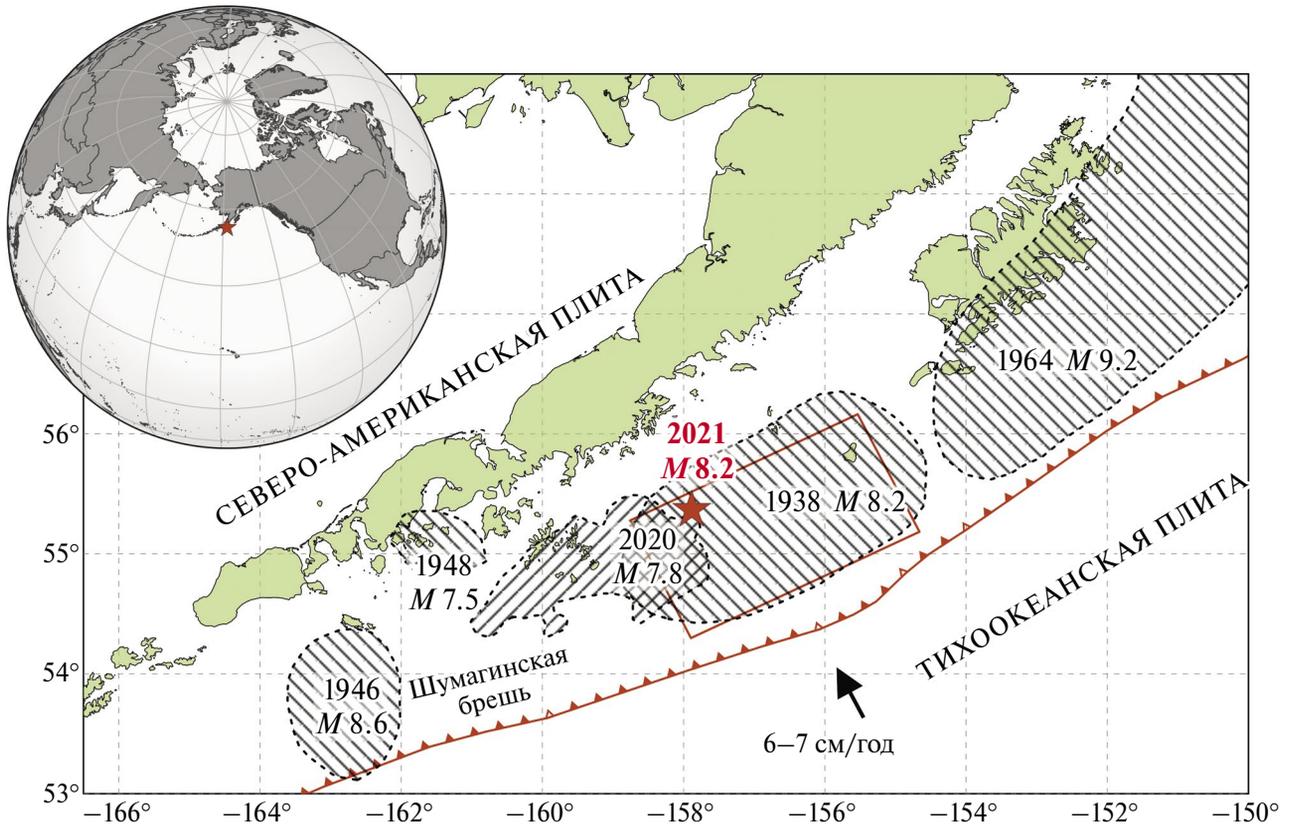


Рис. 1. Область землетрясения Чигник, Аляска, 29.07.2021 г. Красным прямоугольником обозначена геометрия поверхности разрыва [Конвисар и др., 2023]. Эпицентр землетрясения (красная звезда) дан по данным USGS. Заштрихованные области показывают зоны афтершоков прошлых сильных землетрясений на границе плит [Davies et al., 1981; Liu et al., 2022]. Красная линия с зубцами – положение оси океанического желоба.

выполненных с 17.07.2021 г. по 10.08.2021 г. с двух орбит – восходящей и нисходящей, и покрывающих период землетрясения. Поля смещений земной поверхности рассчитаны в специализированном программном пакете ENVI SARscape. Временные ряды смещений на пунктах GPS взяты с сайта UNAVCO³. При поиске решения задавалось регуляризирующее условие близости угла подвижки к 95° , согласно одной из нодальных плоскостей GSMT решения.

В нашей модели область разрыва была аппроксимирована одной плоскостью с углом простираения 243° и падения 14° , протяженностью 225 км по простираанию и 126 км по падению, которая была разделена на 48 одинаковых элементов (рис. 2). Размер очаговой области задан с учетом положения и размеров облака афтершоков.

Согласно этой модели, тип смещений – это практически чистый надвиг, а смещения, в целом, произошли по всей очаговой области.

³ <https://www.unavco.org/>

Основные смещения получены на глубинах 25–40 км, где они достигают максимума в 5.7 м на элементе с координатами центра 55.481° с.ш. и 157.695° з.д. (координаты эпицентра по данным USGS – 55.364° с.ш. и 157.888° з.д.), при среднем смещении по всей плоскости 2.2 м. Сейсмический момент, рассчитанный при значении модуля сдвига 32 ГПа по полученным параметрам площадок и смещениям на них, составил 1.95×10^{21} Н·м, что соответствует магнитуде $M_w = 8.13$.

Данные о косейсмических смещениях земной поверхности были очень детальными, поэтому в работе [Конвисар и др., 2023] модель поверхности сейсмического разрыва построена без включения в функционал обратной задачи косейсмической гравитационной аномалии. Ниже мы приводим результаты анализа временных вариаций гравитационного поля и их сравнение с косейсмической гравитационной аномалией, рассчитанной по нашей модели.

Косейсмические изменения гравитационного поля определены с использованием ежемесячных

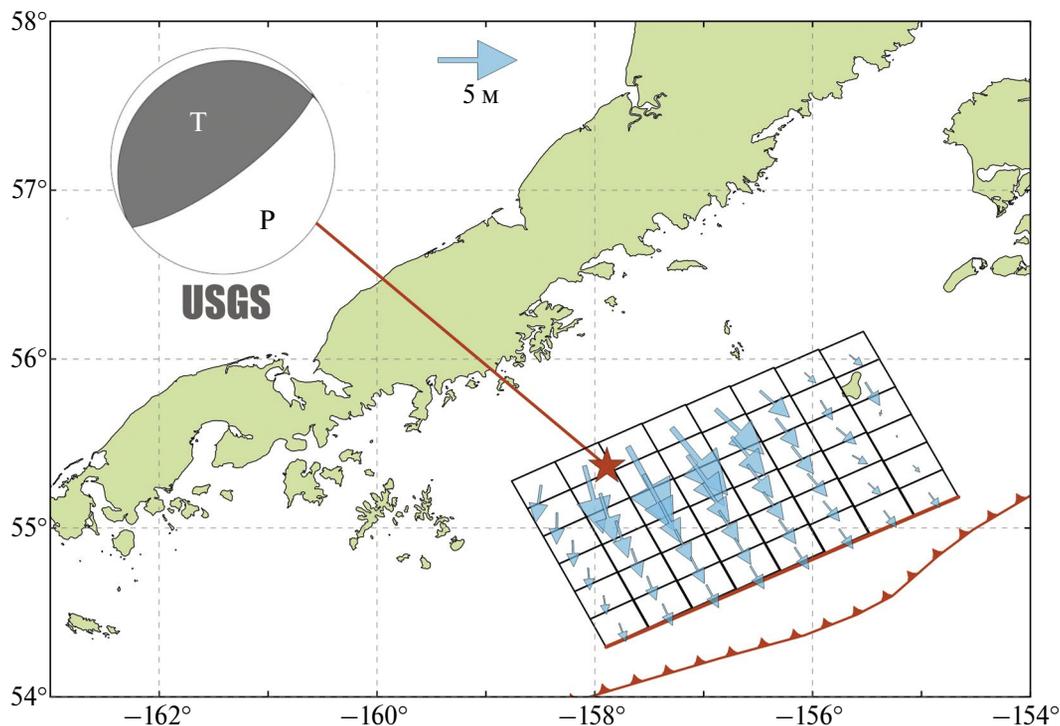


Рис. 2. Элементы модели поверхности сейсмического разрыва землетрясения Чигник. Стереографическая проекция нодальных плоскостей землетрясения дана по данным USGS. Голубые стрелки – смещения на поверхности разрыва, максимум которых равен 5.7 м. Верхняя грань поверхности разрыва показана красной линией. Верхние кромки каждого ряда элементов находятся на глубинах 10.0, 15.1, 20.2, 25.3, 30.3, 35.4 км.

моделей спутников GRACE-FO, публикуемых на сайте International Centre for Global Earth Models (ICGEM)⁴. Нами использованы модели, рассчитанные в Центре реактивного движения NASA⁵. Данные модели имеют максимальное количество сферических гармоник равное $N = 96$, что в среднем соответствует полудлине волны 208 км. Поэтому косейсмические гравитационные аномалии могут быть выделены только для значительных землетрясений, имеющих достаточно протяженный очаг. Для устойчивого их выделения магнитуда события должна быть больше 8.5–8.6 [Mikhailov et al., 2004; de Viron et al., 2008]. Во многих случаях, более устойчиво можно оценивать тренды во временных рядах гравитационного поля до и после землетрясения, которые можно использовать для выделения косейсмического скачка и исследования постсейсмических процессов (см., например, работу [Михайлов и др., 2014]).

Временные вариации гравитационного поля, кроме геодинимического сигнала, включают сезонные колебания и различного рода шумы.

⁴ <http://icgem.gfz-potsdam.de/>

⁵ NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) 2022 GRACE-FO Monthly Geopotential Spherical Harmonics CSR Release 6.1 (RL06.1). <https://doi.org/10.5067/GFL20-MC061>

Кроме того, на востоке от очаговой области землетрясения Чигник находится крупный ледник, который интенсивно тает и создает обширную отрицательную аномалию. В силу малого количества сферических гармоник в ежемесячных моделях ($N = 96$) по периферии отрицательной аномалии возникают полосы положительных аномалий – так называемый “эффект Гиббса” (рис. 3). Это затрудняет выделение косейсмической и постсейсмической аномалий в гравитационном поле в интересующей нас области.

Тем не менее, несмотря на то, что модели высокого разрешения в области землетрясения Чигник сильно зашумлены, и магнитуда землетрясения меньше оценок устойчивого выделения косейсмической аномалии, выделить косейсмический скачок все же удастся. Мы выполнили анализ ежемесячных гравитационных моделей за два периода, до и после землетрясения: с октября 2018 г. до июня 2021 г. и с августа 2021 г. по май 2023 г. Временные ряды аппроксимировались линейной функцией плюс сезонные годовые и полугодовые колебания. Выделенные линейные тренды – “полезный сигнал” – в спутниковых гравитационных

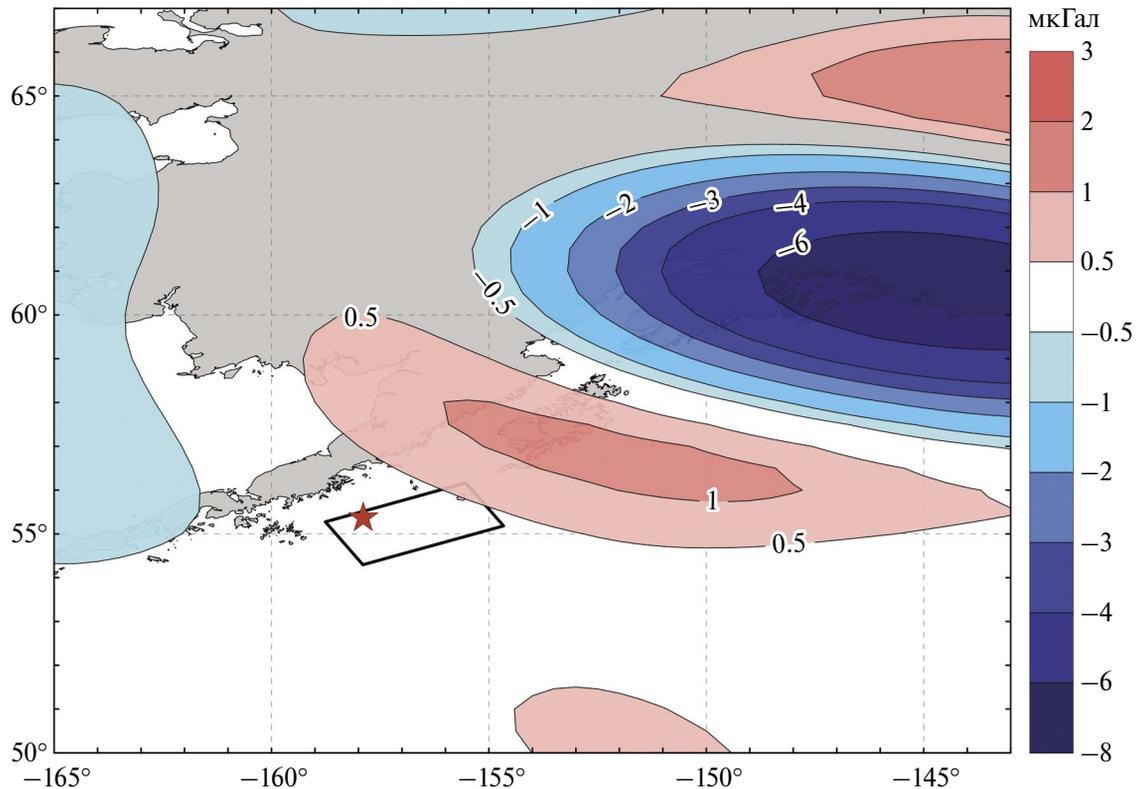


Рис. 3. Суммарное изменение линейного тренда в гравитационном поле, рассчитанное по моделям спутников GRACE-FO, за период до землетрясения Чигник, с октября 2018 г. до июня 2021 г. Прямоугольником показана проекция на земную поверхность модели сейсмического разрыва [Конвисар и др., 2023]. Выделяется крупная отрицательная аномалия, связанная с таянием ледника, и сопряженные положительные аномалии, возникающие из-за малого числа сферических гармоник в ежемесячных гравитационных моделях спутников GRACE-FO.

аномалиях оказался небольшим, что соответствует нашим предыдущим оценкам.

На рис. 3 показано суммарное изменение трендовой составляющей во временных рядах гравитационного поля за 33 месяца до землетрясения Чигник, посчитанное по ежемесячным моделям с октября 2018 г. по июнь 2021 г.

На рис. 4 цветовой шкалой показана косейсмическая гравитационная аномалия, рассчитанная по нашей модели сейсмического разрыва, а изолиниями показан скачок во временных рядах гравитационного поля, рассчитанный как разность значений линейных трендов в августе и июне 2021 г., т.е. после и до землетрясения. На рис. 5 показаны временные ряды изменения гравитационного поля в точках максимума и минимума косейсмической аномалии. Видно, что, как и предсказывалось теоретическими оценками, косейсмический скачок очень мал, и его трудно выделить на фоне помех.

Теоретическая косейсмическая гравитационная аномалия меняется в пределах от -3.7 до 3.2 мкГал (10^{-6} см/с²). Аномалия, выделенная по

временным рядам, лежит в пределах от -1.9 до 2.6 мкГал. Морфология аномалий близкая, хотя на рис. 4 наблюдается некоторое смещение экстремумов. Здесь надо принять во внимание, что разрешающая способность ежемесячных гравитационных моделей соответствует аномалии размером в 200 км, т.е. двум градусам широты. Учитывая невысокую разрешающую способность, уровень шумов (рис. 5) и то, что гравитационное поле при построении модели поверхности сейсмического разрыва не использовалось, такое согласование совсем неплохое.

ВЯЗКОУПРУГАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

Построенная модель поверхности сейсмического разрыва позволяет выполнить моделирование процесса вязкоупругой релаксации и рассчитать постсейсмические смещения и гравитационные аномалии, которые зависят от модели строения Земли и, главным образом, от принятой вязкости астеносферы. Моделирование данного процесса нами выполнялось с использованием решения задачи о вязкоупругой

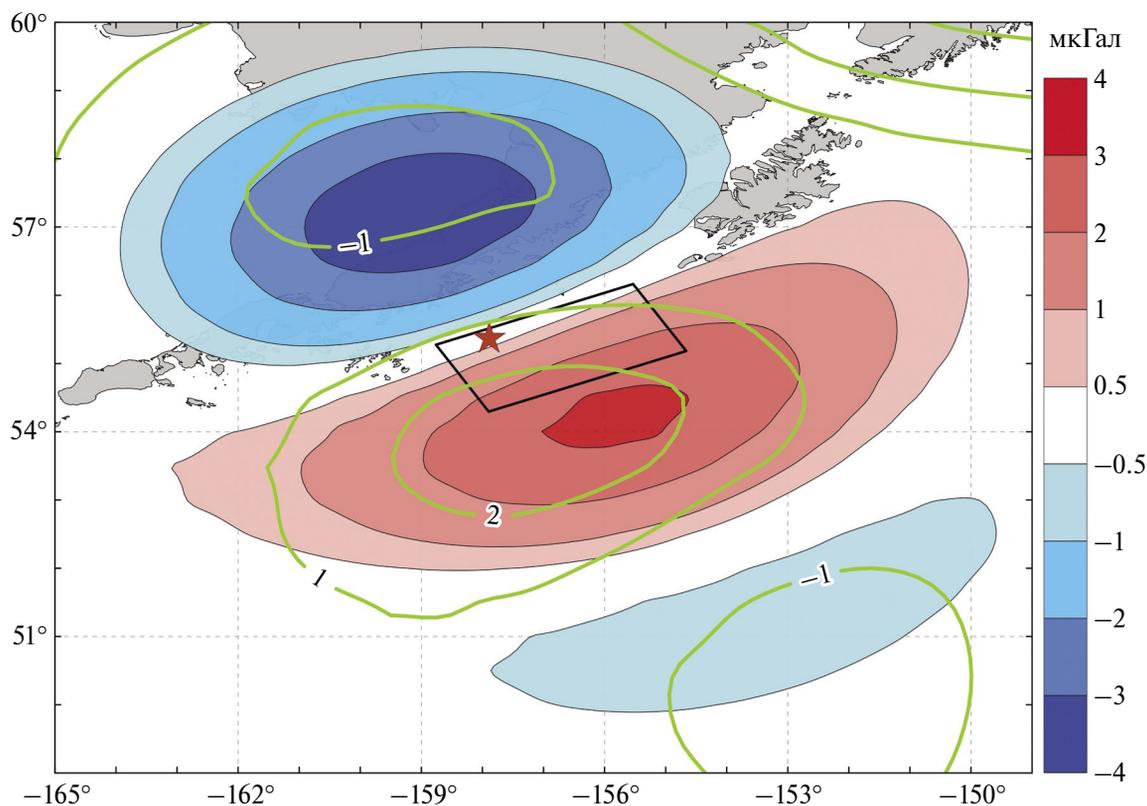


Рис. 4. Косейсмическая гравитационная аномалия. Цветом показана теоретическая аномалия, рассчитанная по модели поверхности разрыва. Изолинии – аномалия в очаговой области, полученная по разности линейных трендов до и после землетрясения.

релаксации напряжений в сферической радиально расслоенной планете [Pollitz, 1992; 1997]. Программный код *Visco1D*, реализующий данное решение, доступен на сайте USGS. Переменной величиной была вязкость астеносферного слоя.

На рис. 6 показаны горизонтальные смещения пунктов GPS, которые должны были произойти к 2023 г. (т.е. через 17 месяцев после землетрясения), если провести расчет с параметрами построенной нами модели поверхности разрыва и принять в качестве модели среды модель Максвелла с вязкостью астеносферы 10^{18} Па·с, хотя для астеносферы это, по всей вероятности, оценка снизу.

При принятой в расчетах низкой вязкости астеносферы смещения севернее эпицентральной области (станции AC21, AC40, AB13) близки к расчетным, в то время как на станции AC13 и других станциях, расположенных на островах, близких к эпицентральной зоне, как и на удаленных станциях, смещения существенно различаются и по направлению, и по величине. Таким образом, результаты численного моделирования процесса вязкоупругой релаксации не

согласуются с данными смещений пунктов GPS в окрестности эпицентральной области, что показывает, что в случае землетрясения Чигник процесс вязкоупругой релаксации играет, скорее, второстепенную роль.

ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЙ КРИП

Многие крупные землетрясения в зонах субдукции инициировали постсейсмический крип на поверхности разрыва, на ее продолжении вдоль зоны субдукции и/или на глубину (см., например, работы [Ozawa et al., 2012; Perfettini et al., 2010; Vigny et al., 2011; Михайлов и др., 2018]). Область афтершоковой активности часто маркирует область крипа [Hsu et al., 2006; Pritchard, Simons, 2006; Perfettini et al., 2010], поэтому для ее определения мы использовали распределение афтершоков (рис. 7). Афтершоки взяты из регионального сейсмического каталога (более подробно см. во второй части статьи [Смирнов и др., 2024]). Важно, что в области поверхности разрыва землетрясения Чигник афтершоки фиксируются до глубин в 100 км, а восточнее, на север от очаговой зоны Великого Аляскинского

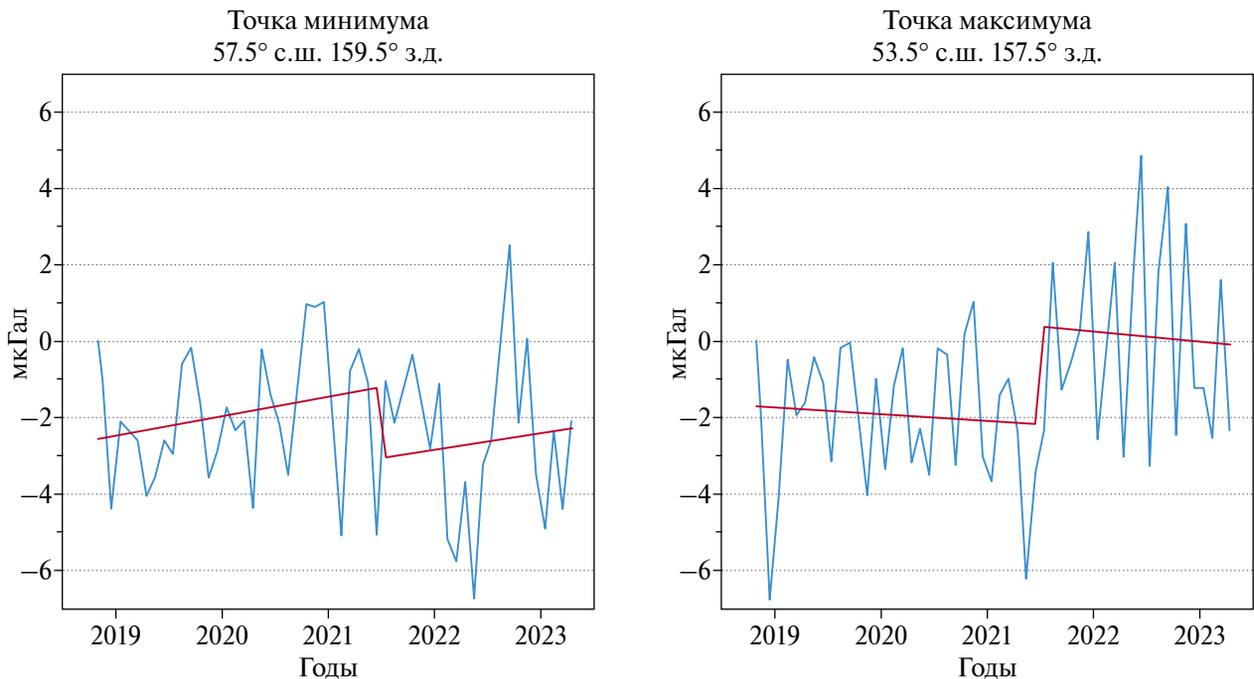


Рис. 5. Временные ряды изменения гравитационного поля в точке максимума (справа) и минимума (слева) сейсмической аномалии, рассчитанной по моделям спутников GRACE-FO (показана изолиниями на рис. 4). Синим цветом показаны временные ряды, красным – линейные тренды.

землетрясения 1964 г., целая серия афтершоков зафиксирована до глубин в 150 км.

При моделировании процесса постсейсмического крипа нами были использованы временные ряды постсейсмических смещений пунктов GPS и данные спутниковой радарной интерферометрии, полученные по двадцати радарным снимкам с нисходящей орбиты спутника Сентинель-1А, выполненным за период с 29.07.2021 г. по 17.09.2021 г. (таблица). Для интерферометрической обработки снимков использовался специализированный сервис ASF HyP3⁶ (Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline). Для подавления случайных помех и влияния атмосферы было применено суммирование развернутых парных интерферограмм, рассчитанных по снимкам, полученным через каждые 12 дней, т.е. – с минимальным интервалом повторной съемки данного спутника. Постсейсмические смещения пунктов GPS получены с сайта UNAVCO.

Постсейсмические гравитационные аномалии при исследовании крипа не использовались, поскольку проведенные нами исследования показали, что для устойчивого определения трендов изменения гравитационного поля в моделях спутников GRACE-FO, при имеющемся уровне шумов в районе землетрясения Чигник,

необходимо иметь данные за 2.5–3 года, т.е. 30–36 моделей. В настоящее время мы располагаем ежемесячными моделями гравитационного поля до мая 2023 г., т.е. только за 22 месяца после землетрясения. Постсейсмический тренд пока выделяется неустойчиво, и мы планируем продолжить работу с трендами в гравитационном поле после накопления не менее 36 моделей.

Нами были рассчитаны модели крипа после землетрясения Чигник с различной геометрией области постсейсмических смещений. В конечном счете была выбрана модель, состоящая из 8 элементов (рис. 7), которая дала наилучшее решение, в смысле минимума среднеквадратического отклонения с постсейсмическими смещениями, регистрируемыми на пунктах GPS, и смещениями в направлении на спутник, полученными методами спутниковой радарной интерферометрии. Область крипа в этой модели аппроксимирована двумя плоскостями. Одна имеет угол падения 11° , длину по простиранию 225 км, длину по падению 160 км, и глубины верхней и нижней граней 10 и 40.5 км соответственно. Эта плоскость разделена на четыре равных элемента – два по простиранию и два по падению. Другая, более глубокая плоскость, имеет угол падения 22° , длину по простиранию 400 км, длину по падению 80 км, и глубины верхней и нижней граней 40.5 и 70 км соответственно,

⁶ <https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/>

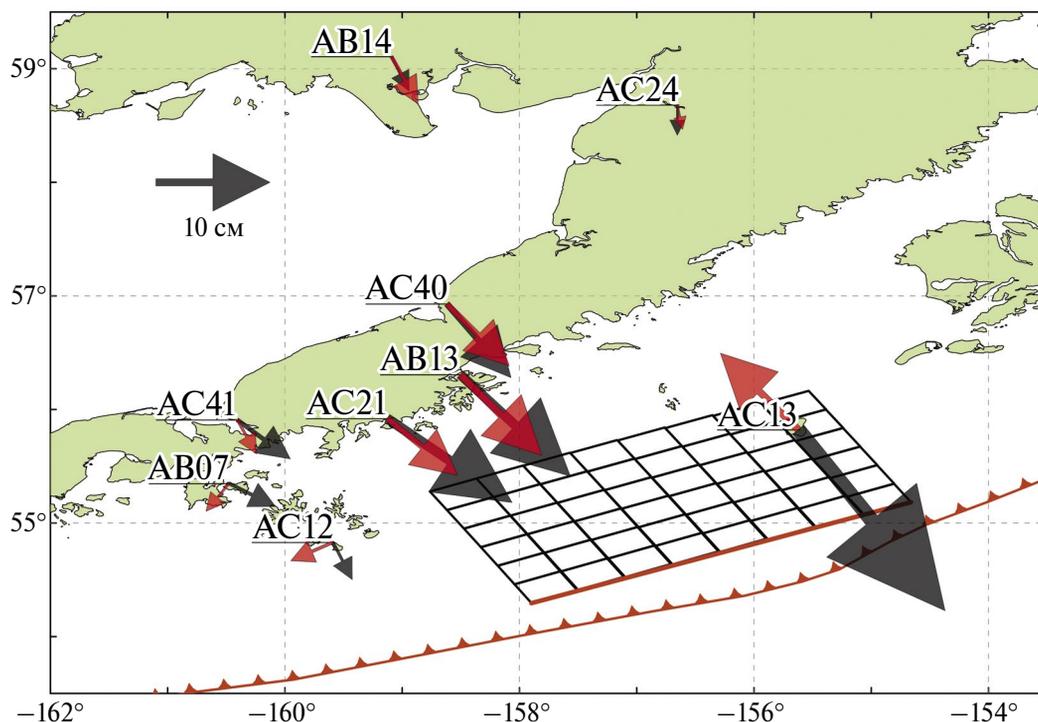


Рис. 6. Горизонтальные смещения пунктов GPS в результате процесса постсейсмической вязкоупругой релаксации, рассчитанные по построенной нами модели поверхности разрыва землетрясения Чигник. В качестве реологической модели среды принята модель Максвелла с вязкостью астеносферы 10^{18} Па·с. Красные стрелки – модельные смещения к 2023 г. Черные стрелки – реальные смещения на пунктах GPS за тот же период. Прямоугольниками показана геометрия поверхности косейсмического разрыва.

Пары радарных снимков с нисходящей орбиты спутника Сентинель-1А, использованные в работе, в формате ДД.ММ.ГГ_чч:мм:сс

| Орбита | Первый снимок | Второй снимок |
|--------|---------------------|---------------------|
| 102 | 31.07.2021_16:47:14 | 12.08.2021_16:47:14 |
| – | 31.07.2021_16:47:39 | 12.08.2021_16:47:39 |
| – | 12.08.2021_16:47:14 | 24.08.2021_16:47:15 |
| – | 12.08.2021_16:47:39 | 24.08.2021_16:47:40 |
| – | 24.08.2021_16:47:15 | 05.09.2021_16:47:16 |
| – | 24.08.2021_16:47:40 | 05.09.2021_16:47:41 |
| – | 05.09.2021_16:47:16 | 17.09.2021_16:47:16 |
| – | 05.09.2021_16:47:41 | 17.09.2021_16:47:41 |
| 73 | 29.07.2021_17:03:41 | 10.08.2021_17:03:42 |
| – | 29.07.2021_17:04:06 | 10.08.2021_17:04:06 |
| – | 10.08.2021_17:03:42 | 22.08.2021_17:03:42 |
| – | 10.08.2021_17:04:06 | 22.08.2021_17:04:07 |
| – | 22.08.2021_17:03:42 | 03.09.2021_17:03:43 |
| – | 22.08.2021_17:04:07 | 03.09.2021_17:04:08 |
| – | 03.09.2021_17:03:43 | 15.09.2021_17:03:43 |
| – | 03.09.2021_17:04:08 | 15.09.2021_17:04:08 |

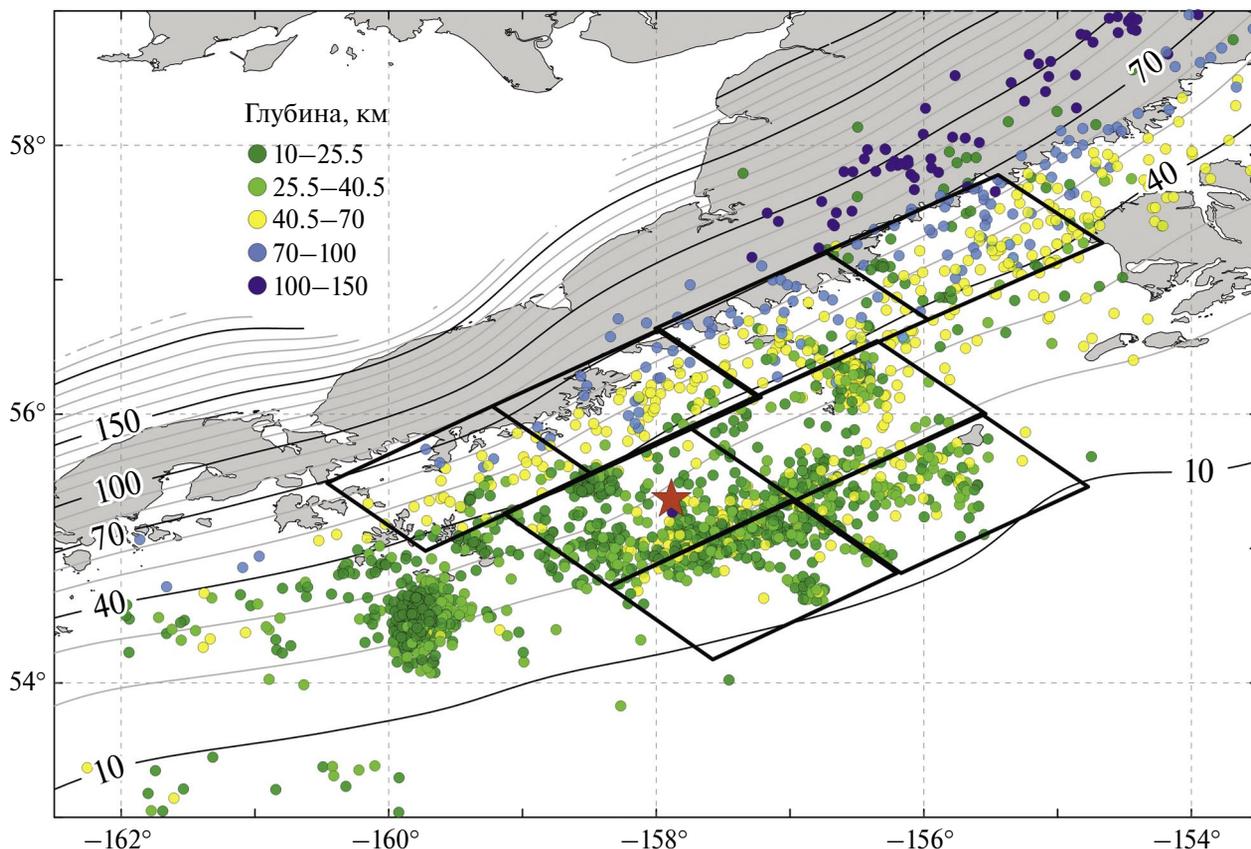


Рис. 7. Распределение афтершоков и область, выбранная для моделирования постсейсмического крипа (черные прямоугольники). Изолиниями показана глубина поверхности погружающейся плиты по модели Slab2 [Hayes et al., 2018]. Цветом показана глубина сейсмических событий в км.

и разделена на четыре равных элемента по проектированию.

Радарный сигнал спутников Сентинель-1 имеет длину волны 5.6 см. Такой сигнал при съемке в зимний период, как правило, не проникает через снег до поверхности Земли. Из-за этого данные интерферометрии можно было использовать только до установления снежного покрова. В связи с этим, мы построили модели постсейсмического крипа для одной и той же геометрии, но для двух периодов с разными входными данными:

1) смещения с 29.07.2021 г. по 15.09.2021 г. с использованием данных GPS и интерферометрии (рис. 8);

2) смещения с 29.07.2021 г. по 31.12.2021 г. с использованием только данных GPS (рис. 9).

На рис. 8 показана проекция плоскостей на дневную поверхность и сопоставление смещений пунктов GPS и смещений земной поверхности в направлении на спутник по данным интерферометрии. Различия в абсолютных величинах горизонтальных смещений на пунктах GPS не

превосходят 1 см. Наибольшие различия в поле смещения по данным РСА интерферометрии фиксируются в области локального максимума у береговой линии и, очевидно, связаны с недостаточной детальностью модели поверхности, принятой для описания крипового процесса.

В целом, направления смещений на элементах поверхности постсейсмического крипа на рис. 8 и рис. 9 близки, что демонстрирует устойчивость полученных результатов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

При моделировании процесса вязкоупругой релаксации в ряде работ принята гипотеза о пониженной вязкости астеносферы в зонах субдукции, так как очень большие скорости постсейсмических смещений (в случае землетрясения Чигник максимальная горизонтальная скорость постсейсмических смещений одного из пунктов GPS составила 3.65 см/год) могут быть получены только при

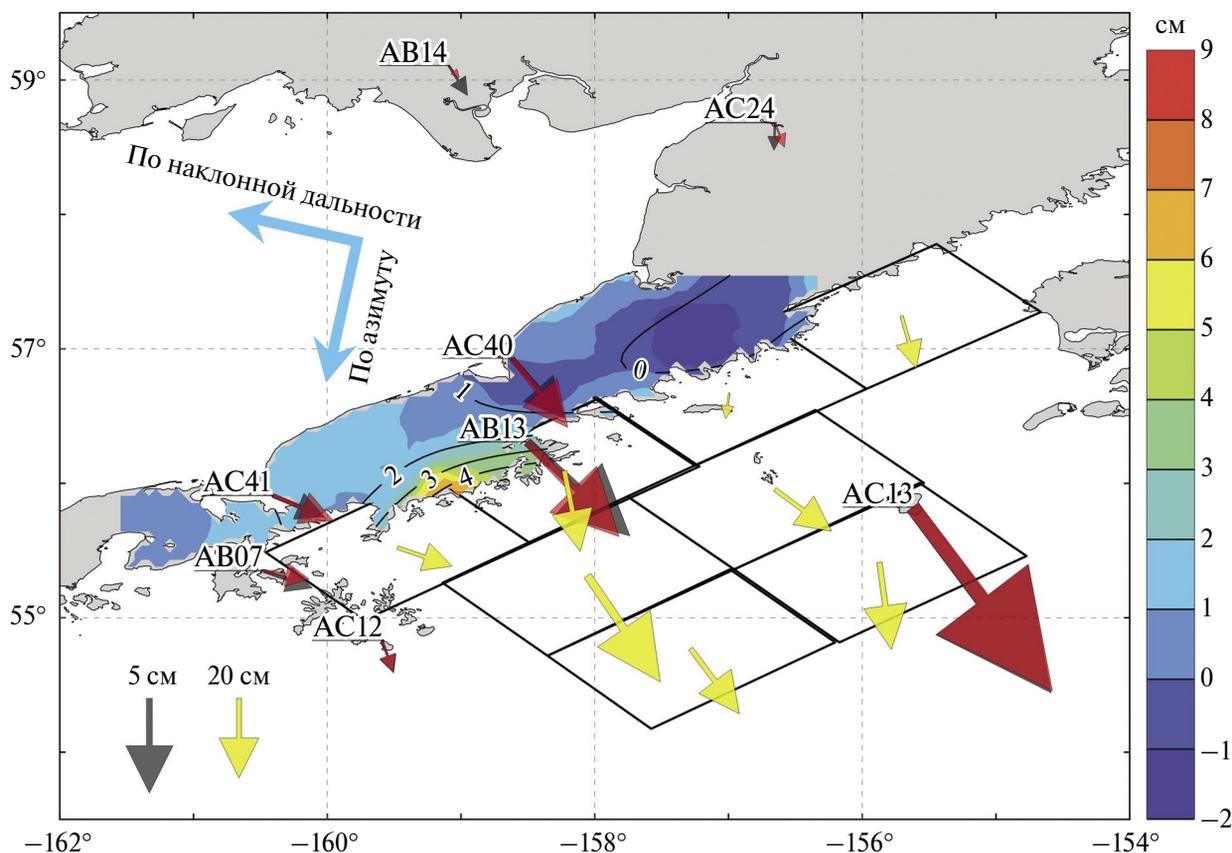


Рис. 8. Модель постсейсмического крипа в области землетрясения Чигник за период с 29.07.2021 г. по 15.09.2021 г. Совмещенные стрелки – горизонтальные смещения на пунктах GPS: красные – расчетные, черные – измеренные. Желтые стрелки – смещения на соответствующем элементе поверхности крипа. Цветная карта – поле смещений земной поверхности в направлении на спутник по данным радарной интерферометрии. Изолинии – расчетные смещения, также в направлении на спутник. Голубые стрелки указывают направление полета (азимут) и направление распространения радарного сигнала (дальность).

понижении вязкости астеносферы [Kogan et al., 2013; Han et al., 2016; и др.]. Как было показано в работе [Михайлов и др., 2020] для землетрясения Мауле, Чили, и подтвердилось в ходе этого исследования, для многих субдукционных землетрясений даже существенное понижение вязкости астеносферы не позволяет согласовать наблюдаемые и модельные поля смещений во всей области смещений. Часто смещения удастся согласовать в дальней зоне, но при наличии данных в области очага землетрясения они во многих случаях существенно отличаются от рассчитанных по модели вязкоупругой релаксации. Высокие скорости смещений в первые 1–2 года после землетрясения, вероятнее всего, связаны с постсейсмическим крипом. В то же время, имеется целый ряд, в основном внутриплитных, землетрясений, когда криповые смещения невелики, и наблюдаемые (обычно медленные) смещения хорошо объясняются вязкоупругой релаксацией с вязкостью порядка 10^{19} Па·с (см., например, работу [Diament et al., 2020]).

Модель постсейсмического крипа во многих случаях может объяснить смещения, наблюдаемые после землетрясений [Михайлов и др., 2014; 2020; и др.]. Так и в модели постсейсмических смещений для землетрясения Чигник подвижки получены непосредственно на поверхности разрыва, на ее продолжении на глубину по контакту плит до 70 км, также они захватывают соседние глубокие участки зоны субдукции.

По нашим оценкам смещения через 1.5 месяца, к 15.09.2021 г., составили около 13 см в нижней части модели и до 32 см в ее верхней части. К концу 2021 г. смещения в нижней части поверхности крипа составили 14 см и достигли 45 см в верхней. Уменьшение средней скорости смещений указывает на затухание этого процесса. Учитывая размеры области смещений, суммарный сейсмический момент к концу 2021 г., при значении модуля сдвига 32 ГПа, эквивалентен землетрясению магнитудой $M_w = 7.7$. Смещения в верхней части модели – это, в основном, надвиг, а в нижней части

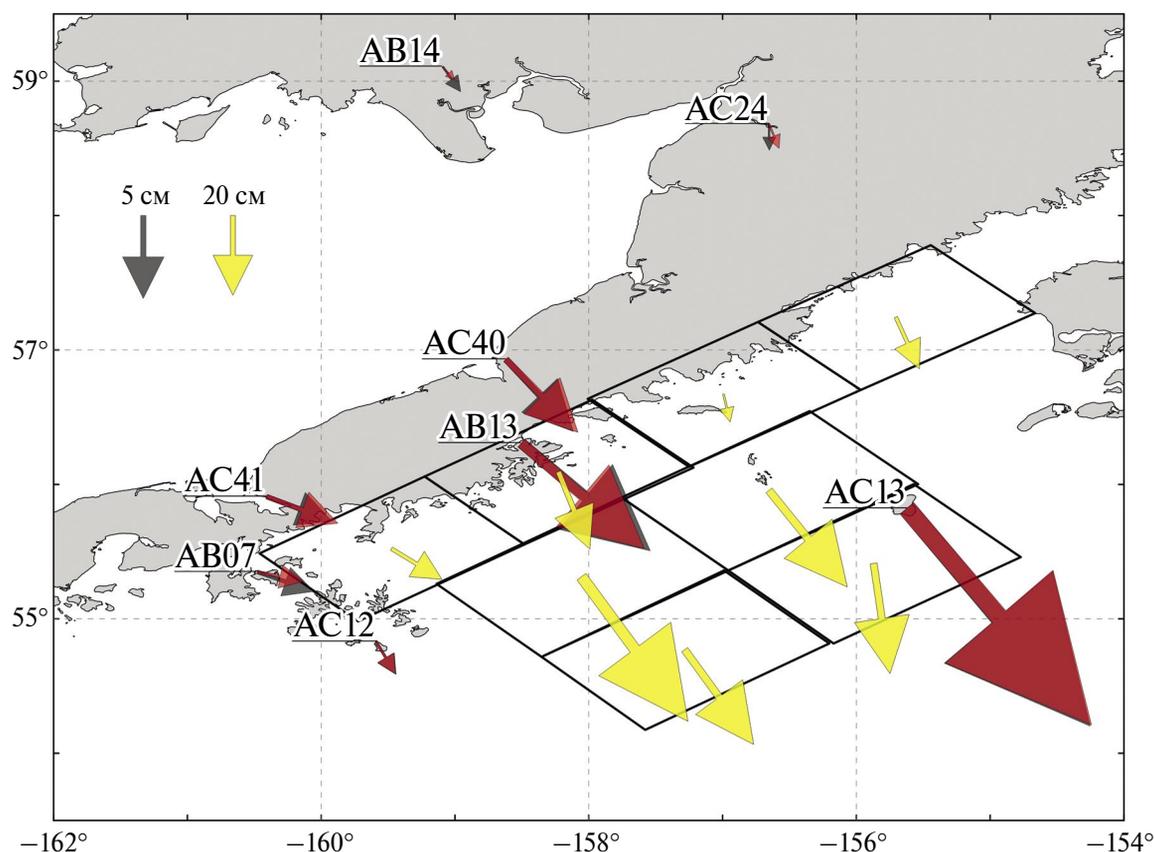


Рис. 9. Модель постсейсмических смещений в области землетрясения Чигник, построенная по данным о смещениях пунктов GPS за период с 29.07.2021 г. по 31.12.2021 г. Совмещенные стрелки – горизонтальные смещения на пунктах GPS: красные – расчетные, черные – измеренные. Прямоугольники показывают модель области постсейсмического крипа, желтые стрелки в середине прямоугольников – направления смещений на соответствующих элементах.

смещения на крайних элементах имеют и сдвиговую составляющую, направленную к очаговой области землетрясения Чигник (рис. 8 и рис. 9).

Хорошее совпадение модели постсейсмического крипа с данными GPS и PCA-интерферометрии позволяет заключить, что наблюдаемые постсейсмические процессы, вероятнее всего, в основном, связаны с процессом постсейсмического крипа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение различных стадий сейсмического цикла в восточной части Алеутской зоны субдукции позволяет получить новую информацию о геодинамических процессах, происходящих в зонах субдукции. Данная область интересна тем, что в ней чередуются протяженные, полностью запертые участки, на которых происходят катастрофические землетрясения, и участки со слабым сцеплением и низкой сейсмической активностью. В данном районе имеется сеть

постоянных GPS-станций, но для спутниковой радарной интерферометрии и спутниковой гравиметрии район является достаточно сложным. Это требует тщательного подхода к анализу данных, моделированию и интерпретации результатов.

В работе приведены результаты анализа постсейсмических процессов, происходивших в области землетрясения Чигник после 29.07.2021 г. С использованием ранее построенной модели поверхности сейсмического разрыва [Конвисар и др., 2023] выполнено моделирование процесса вязкоупругой релаксации. Полученные результаты показали, что при снижении вязкости астеносферы до 10^{18} Па·с удается приблизить модельные скорости смещений к зарегистрированным на береговых пунктах GPS. Однако смещения на островах, находящихся вблизи эпицентра землетрясения, отличаются от модельных не только по величине, но и по направлению. В то же время, модель постсейсмического крипа хорошо согласуется со

смещениями GPS и полем смещений в направлении на спутник по данным интерферометрии.

В рамках данной работы также проведен анализ временных изменений гравитационного поля в области землетрясения. Полученная косейсмическая аномалия согласуется с аномалией, рассчитанной по модели поверхности сейсмического разрыва. Но постсейсмическую аномалию выделить пока не удается из-за недостаточно длинных временных рядов в гравитационных моделях после землетрясения 29.07.2021 г.

Анализ постсейсмических процессов продолжен во второй части этой работы [Смирнов и др., 2024]. В ней выполнен сравнительный анализ эволюции во времени постсейсмических смещений различных пунктов GPS и афтершоковой активности, что также позволяет сделать заключения о природе постсейсмических процессов в очаговой области землетрясения Чигник.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные радарные снимки спутников Сентинель-1. Мы благодарим Консорциум Унавсо за предоставление доступа к записям станций GPS и Ф. Поллитца (USGS), который разработал программные коды Static1D и Visco1D и сделал их доступными для научного сообщества. Также авторы благодарят создателей сервиса International Centre for Global Earth Models (ICGEM) и NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) 2022 GRACE-FO Monthly Geopotential Spherical Harmonics CSR Release 6.1 (RL06.1) (<https://doi.org/10.5067/GFL20-MC061>) за опубликованные ежемесячные модели спутников GRACE-FO и разработчиков сервиса ASF HyP3 (Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline), который был использован для расчета парных интерферограмм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00064, <https://rscf.ru/project/23-17-00064/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Конвисар А.М., Михайлов В.А., Волкова М.С., Смирнов В.Б. Модель поверхности сейсмического разрыва землетрясения “Чигник” (Аляска, США) 29.07.2021 г.

по данным спутниковой радарной интерферометрии и ГНСС // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 74–83. <https://doi.org/10.31857/S0203030623700256>

Михайлов В.О., Диаман М., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Оценка относительной роли постсейсмического крипа и вязкоупругой релаксации после Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. с использованием данных спутниковой геодезии и гравиметрии // Вестник МГУ. Сер. Физика и астрономия. 2018. № 5. С. 84–89.

Михайлов В.О., Пане И., Хаен М., Тимошкина Е.П., Бонвало С., Ляховский В., Диаман М., Девирон О. Сравнительный анализ временных вариаций глобального гравитационного поля по данным спутников Грейс в областях трех недавних гигантских землетрясений // Физика Земли. 2014. № 2. С. 29–40.

Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Хайретдинов С.А., Дмитриев П.Н. К вопросу о природе постсейсмических деформационных процессов в районе землетрясения Мауле, Чили, 27.02.2010 г. // Физика Земли. 2020. № 6. С. 38–47. <https://doi.org/10.31857/S0002333720060046>

Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Конвисар А.М. Постсейсмические процессы в области землетрясения Чигник на Аляске 29.07.2021. Часть II: развитие смещений во времени и связь с афтершоковой активностью // Физика Земли. 2024. № 4. С. 35–49.

Ali S. T., Freed A. M. Contemporary deformation and stressing rates in Southern Alaska // Geophys. J. Int. 2010. V. 183. P. 557–571. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04784.x>

Argus D. F., Gordon R. G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochem. Geophys. Geosyst. 2011. V. 12. P. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>

Cross R. S., Freymueller J. T. Evidence for and implications of a Bering plate based on geodetic measurements from the Aleutians and western Alaska // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007JB005136>

Davies J., Sykes L., House L., Jacob K. Shumagin seismic gap, Alaska Peninsula: History of great earthquakes, tectonic setting, and evidence for high seismic potential // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 3821–3855. <https://doi.org/10.1029/JB086iB05p03821>

De Viron O., Panet I., Mikhailov V., Van Camp M., Diament M. Retrieving earthquake signature in grace gravity solutions // Geophys. J. Int. 2008. V. 174. P. 14–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03807.x>

Diament M., Mikhailov V., Timoshkina E. Joint inversion of GPS and high-resolution GRACE gravity data for the 2012 Wharton basin earthquakes // J. Geodyn. 2020. V. 136. Article ID 101722. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101722>

Drooff C., Freymueller J. T. New constraints on slip deficit on the Aleutian megathrust and Inflation at Mt. Veniaminof, Alaska from repeat GPS measurements // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2020GL091787>

Elliott J. L., Grapenthin R., Parameswaran R. M., Xiao Z., Freymueller J. T., Fusso L. Cascading rupture of a megathrust // Sci. Adv. 2022. V. 8. P. 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm4131>

- Frey Mueller J.T., Woodard H., Cohen S.C., Cross R., Elliott J., Larsen C.F., et al.* Active deformation processes in Alaska, based on 15 years of GPS measurements // J.T. Freymueller, P.J. Haeussler, R.L. Wesson, G. Ekström (eds.). Active tectonics and seismic potential of Alaska. AGU. 2008. P. 1–42. <https://doi.org/10.1029/179GM02>
- Han S., Sauber J., Pollitz F.* Postseismic gravity change after the 2006–2007 great earthquake doublet and constraints on the asthenosphere structure in the central Kuril Is-land // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 3169–3177. <https://doi.org/10.1002/2016GL068167>
- Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., Hearne M., Flamme H., Furtney M., Smoczyk G.M.* Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // *Science*. 2018. V. 362(6410). P. 58–61. <http://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Hsu Y.-J., Simons M., Avouac J.-P., Galetzka J., Sieh K., Chlieh M., Natawidjaja D., Prawirodirdjo L., Bock Y.* Frictional afterslip following the 2005 Nias-Simeulue earthquake, Sumatra // *Science*. 2006. V. 312(5782). P. 1921–1926. <https://doi.org/10.1126/science.1126960>
- Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Frymueller J.T.* Rapid postseismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011 // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 3691–3706. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50245>
- Li S., Freymueller J.T.* Spatial variation of slip behavior beneath the Alaska Peninsula along Alaska-Aleutian subduction zone // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 3453–3460. <https://doi.org/10.1002/2017GL076761>
- Liu C., Lay T., Xiong X.* The 29 July 2021 Mw 8.2 Chignik, Alaska Peninsula earthquake rupture inferred from seismic and geodetic observations: Re-rupture of the western 2/3 of the 1938 rupture zone // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. № 4. P. 1–9. <https://doi.org/10.1029/2021JB023676>
- Mikhailov V., Tikhotsky S., Diamant M., Panet I., Ballu V.* Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data? // *EPSL*. 2004. V. 228. P. 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.035>
- Ozawa S., Nishimura T., Munekane H., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T.* Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake Japan // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B07404. <https://doi.org/10.1029/2011JB009120>
- Perfettini H., Tavera, H., Kositsky A., Nocquet J.M., Bondoux F., Chlieh M., Sladen A., Audin L., Farber D., Soler P.* Seismic and aseismic slip on the Central Peru megathrust // *Nature*. 2010. V. 465(7294). P. 78–81. <https://doi.org/10.1038/nature09062>
- Pollitz F.F.* Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. P. 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x>
- Pollitz F.F.* Gravitational-viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 17921–17941. <https://doi.org/10.1029/97JB01277>
- Pollitz F.F.* Postseismic relaxation theory on the spherical Earth // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1992. V. 82. P. 422–453.
- Pritchard M.E., Simons M.* An aseismic slip pulse in northern Chile and along-strike variations in seismogenic behavior // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111(B8). B08405. <https://doi.org/10.1029/2006JB004258>
- Suito H., Freymueller J.T.* A viscoelastic and afterslip post-seismic deformation model for the 1964 Alaska earthquake // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. 1–23. <https://doi.org/10.1029/2008JB005954>
- Vigny C., Socquet A., Peyrat S., Ruegg J.C., Métois M., Madariaga R., Morvan S., Lancieri M., Lacassin R., Campos J., Carrizo D. et al.* The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of central Chile, monitored by GPS // *Science*. 2011. V. 332(6036). P. 1417–1421. <https://doi.org/10.1126/science.1204132>
- Ye L., Bai Y., Si D., Lay T., Cheung K.F., Kanamori H.* Rupture model for the 29 July 2021 Mw 8.2 Chignik, Alaska earthquake constrained by seismic, geodetic, and tsunami observations // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. P. 1–42. <https://doi.org/10.1029/2021JB023676>
- Ye L., Lay T., Kanamori H., Yamazaki Y., Cheung K.F.* The 22 July 2020 M_w 7.8 Shumagin seismic gap earthquake: partial rupture of a weakly coupled megathrust // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2021. V. 562. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2021.116879>

Postseismic Processes in the Region of the July 29, 2021 Chignik Earthquake, Alaska. Part I: Modeling Results

A. M. Konvisar^{a,b,*}, V. O. Mikhailov^a, V. B. Smirnov^{b,a}, and E. P. Timoshkina^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow, 123242 Russia*

^b*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: alexkonvisar@gmail.com

Received February 9, 2024

revised February 19, 2024

accepted March 10, 2024

Abstract – We analyze the postseismic processes in the region of the M_w 8.2 Chignik earthquake, which occurred on July 29, 2021. Using the seismic rupture surface model constructed in our previous paper (Konvisar et al., 2023), we have simulated the viscoelastic relaxation process. The results of the simulation

have shown that reducing the viscosity of the asthenosphere to 10^{18} Pa·s in the calculations gives displacement velocities close to those recorded at the GPS coastal points. However, the displacements on islands close to the earthquake source region differ significantly not only in magnitude but also in direction. At the same time, the constructed model of the postseismic creep is closely consistent with the GPS displacement data and with the LOS (line-of-sight) displacement map derived from radar images acquired from the descending orbit of Sentinel 1A satellite. We also analyze temporal variations of the gravity field in the earthquake region. The obtained coseismic anomaly agrees with the anomaly calculated from the rupture surface model. Due to the insufficiently long series of gravity models after the earthquake, it is not yet possible to isolate the postseismic anomaly. The analysis of the postseismic processes is continued in the second part of this work (Smirnov et al., 2024), where we present the compare the time evolution of the postseismic displacements of various GPS sites with the aftershock activity, which allows us to draw conclusions about the creep nature of the postseismic processes in the source region of the Chignik earthquake.

Keywords: earthquake, Chignik, Alaska, July 29, 2021, displacement fields, GPS, satellite radar interferometry, GRACE-FO, postseismic creep, viscoelastic relaxation