DOI: 10.62994/DVO.2025.32.50.005

ОТРАЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРНОГО АЛТАЯ В ПОЛЯХ СКОРОСТЕЙ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ардюков Д.Г.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

По результатам измерений современных движений Горного Алтая методами космической геодезии (2000–2024 гг.) выделяются несколько этапов сейсмического процесса. Случившееся в сентябре 2003 г. Чуйское землетрясение [1] естественным образом разбивает период наблюдений с 2000 по 2024 гг. на несколько этапов: предсейсмический (2000–2003 гг.), косейсмический (2003–2004 гг.), постсейсмический для эпицентральной области Чуйского землетрясения (2004–2013 гг.) и межсейсмический для остальных районов Горного Алтая, не затронутых значимо воздействием землетрясения (2000–2024 гг.). Для интерпретации использованы 2D и 3D упругие и вязко-упругие модели земной коры.

Пред-сейсмический этап

Модель тектонических плит ITRF2014, которая использована в настоящей работе, построена на последних геодезических данных, состоит из 11 плит, создана в 2016 г. [2, 3]. Следует отметить, что использование модели ITRF2014 дает вклад в ошибку до 0,2 мм по отдельной горизонтальной компоненте. Из значения скоростей для Горного Алтая исключаем нормальное поле – плитное смещение Евразии. Алтайская геодинамическая сеть состояла из 20 пунктов. В итоге в период 2000–2003 гг. будущая эпицентральная область Чуйского землетрясения (радиус 100 км) выделяется скоростью 1,07 мм/год на С и 0,29 мм/год на В, что в два раза больше скорости для остальной территории Горного Алтая.

Ко-сейсмический этап, 2D модель и 3D модель

Экспериментальные значения косейсмических смещений приведены на рисунках 1, 2. В эпицентральной зоне Чуйского земле-

трясения (27.09.2003) оказалось 6 пунктов геодинамической сети. 3D моделирование в рамках упругой модели [4, 5] проведено с использованием параметров землетрясения по данным сейсмологов (сейсмический момент $M_0 = 10^{20}$ Н·м, длина разрыва – 153 км, глубина – 10 км, подвижка – 2 м, для нодальной плоскости – ориентация 130°N, падение –85°, смещение – -160°, при нормальных параметрах коры – модуль Юнга 80 ГПа, коэффициент Пуассона 0,25). Величина смещений по экспериментальным данным составляет в среднем 80–85% от модельных значений, что требует

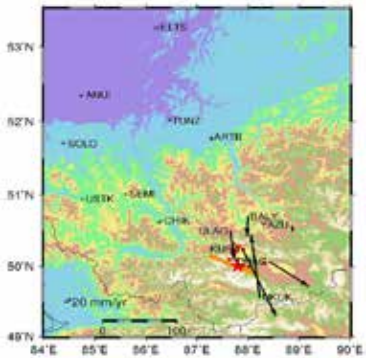
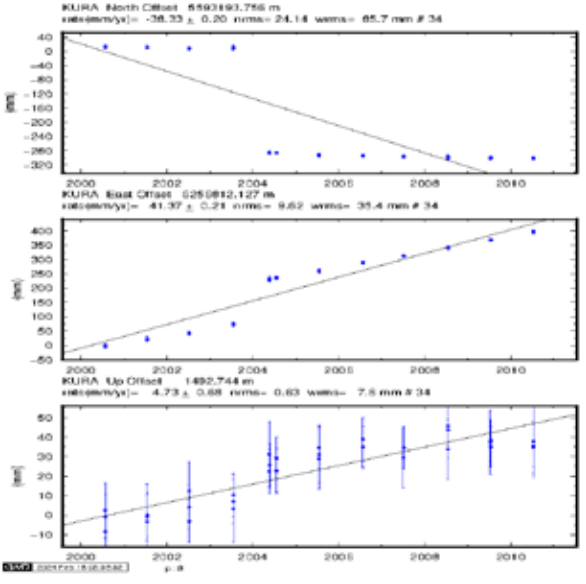


Рис. 1. Вектора косейсмических смещений при Чуйском землетрясении, эпоха 2003–2004 гг., приведены линии разрыва и положение эпицентра (звездочка). Смещение на разрыве 2 метра, смещение KURA (17 км от разрыва) 0.39 м. Справа – смещения пункта KURA по широте, долготе и вертикали, вертикальная шкала в мм, время годы. Смещения пунктов свидетельствуют о правостороннем горизонтальном сдвиге по сейсмическому разрыву. Измерения проводились ежегодно в июле-августе, в 2004 году – в мае и в июле



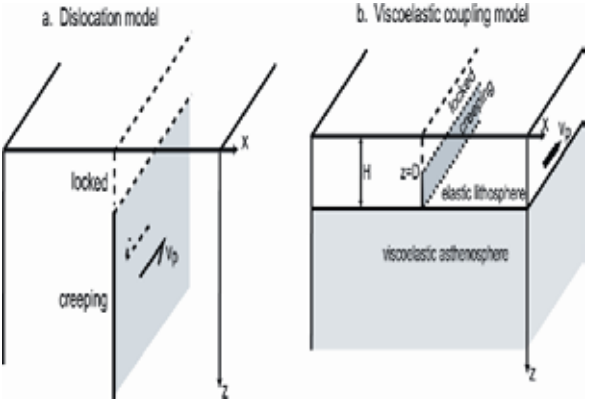


Рис. 2. Постсейсмическая релаксация смещений интерпретировалась в рамках двухслойной модели – упругий слой и вязкоупругий слой (модель Максвелла) На границе упругого и вязкого слоёв «прилипание», т.е. нет разрыва смещений. После быстрого горизонтального смещения верхней части упругого слоя происходит медленное подтягивание нижней части упругого слоя, сцепленной с вязким слоем. Введение в расчёты многослойных моделей слабо искажает результат

изменения параметров. Используя 2D модель, методом итерации остановились на следующей модели землетрясения. При величине относительного смещения по разрыву $\Delta\omega = 2$ м, глубине 14 км, длине разрыва 100 км и при модуле упругости земной коры $\mu = 3{,}2 \cdot 10^{10}$ Па определяем величину сейсмического момента $M_0 = \mu \cdot \Delta\omega \cdot S = 0{,}9 \cdot 10^{20}$ Н·м. Таким образом, для магнитуды землетрясения получаем оценку $M_w = (\lg M_0/1{,}5) - 6{,}03 = 7{,}2$, что хорошо соответствует сейсмологическим оценкам.

Пост-сейсмический этап, эпицентральная зона - 2D модель

В десятилетний период после землетрясения измерения смещений продолжались. При моделировании постсейсмических движений обратимся к модели, включающей упругий слой толщиной H, лежащий на вязко-упругом полупространстве. В этом случае время релаксации по Максвеллу составляет $\tau_M = 2\eta/\mu$, где η – вязкость и μ– модуль сдвига. Имеется соотношение, в котором горизонтальная скорость на земной поверхности пропорциональ-

на расстоянию от разрыва (x), числу сейсмически-активных процессов (n) и времени (t) [6]. Постсейсмическая скорость является функцией четырех параметров: косейсмического сдвига Δu, глубины разлома D, толщины упругого слоя H, параметра релаксации материала τ_M и времени. Из экспериментальных данных о смещениях пунктов за период 2004-2013 гг. определяем время релаксации смещений τ_M = 150 лет. Пусть модуль сдвига нижнего слоя составляет μ = 33 ГПа, скачок смещения на одной стороне разрыва Δu = 1 м, глубина разрыва D = 15 км, толщина упругого слоя H = 20 км, используя соотношение для вязкости $\eta = \mu \cdot \tau_M/2$, получаем величину вязкости нижнего слоя земной коры $\eta = 5 \cdot 10^{19}$ Па·с. Если модуль сдвига достигает μ = 55 ГПа, а время релаксации τ_M = 200 лет, получаем величину вязкости нижнего слоя $\eta = 1{,}1 \cdot 10^{20}$ Па·с.

Межсейсмический этап (2000 – 2024 г.) (скорости вне эпицентральной зоны)

Вне эпицентральной области (9 пунктов) скорость смещения Горного Алтая за весь период измерений 2000–2024 гг. состави-

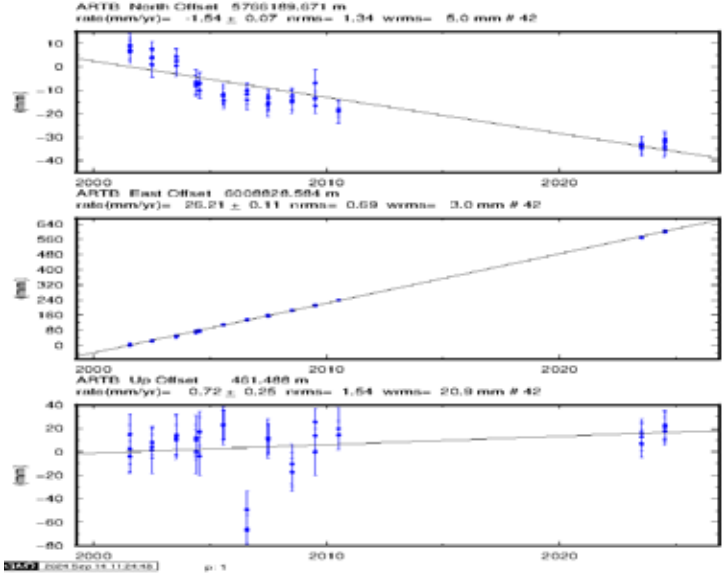


Рис. 3. Геоцентрическое смещение пункта Артыбаш (Телецкое озеро, исток р. Бия), за период 2001–2024 гг. Сверху вниз: смещение на юг, смещение на восток и вертикальное движение. Вертикальная шкала в мм, время – годы

ла 0,8 мм/год на ССЗ, в северной части территории на равнине 0,1–0,2 мм/год (рис. 3). Деформации сжатия на равнинной части на севере территории составляла $2 \cdot 10^{-9}$/год, а на территории Горного Алтая оказались на порядок выше $2 \cdot 10^{-8}$/год. Возможная причина сейсмичности и аномальных смещений–деформаций-напряжений Горного Алтая – это постоянное давление в северном направлении расположенных южнее частей земной коры, где зарегистрировано смещение на север, например, на пунктах Урумчи (6 мм/год) и Лхаса (20 мм/год).

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН номер FWZZ-2022-0019.

Литература

1. Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г., Погребченко В.В. Очаг и афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 года // Физика Земли. 2006. № 2. С. 85-96.
2. Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X. ITRF2014 plate motion model // Geophys. J. Int. 2017. 209(3). P. 1906-1912. https://doi.org/10.1093/gji/ggx136.
3. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. V. 121. P. 6109-6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.
4. Toda S., Stein R.S., Sevilgen V., Lin J. Coulomb 3,3 graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching – user guide // U.S. Geological Survey Open-File Report. 2011. 1060. 63 p.
5. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems. N. Y.: John Wiley & Sons, 1982. 464 p.
6. Segall P. Integrating geologic and geodetic estimates of slip rate on the San Andreas fault system // Int. Geol. Rev. 2002. V. 44. P. 62-82.