

УДК 551.24.02:551.243

ВЗРЫВНОЙ КВАНТ ГЛУБИННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ДАННЫМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ

© 2023 г. Академик РАН В. Г. Бондур¹, М. Б. Гохберг^{1,2}, И. А. Гарагаш^{1,2}, Д. А. Алексеев^{1,2,3,*}

Поступило 29.05.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принято к публикации 04.07.2023 г.

При детальном анализе локальных особенностей напряженно-деформированного состояния в рамках геомеханической модели Южной Калифорнии выделена быстроразвивающаяся высокоамплитудная аномалия деформации сдвига в интервале верхней земной коры (на глубинах до 10 км) — т.н. “взрывной квант деформации” — с максимальным возрастанием амплитуды на два порядка в течение 0.5 мес. Подобные “кванты” могут являться неотъемлемыми элементами всего глубинного деформационного процесса, связанного с сейсмичностью. В работе обсуждаются количественные характеристики глубинных деформационных “квантов” и условия их возникновения.

Ключевые слова: сейсмичность, деформация, квант, напряженное состояние, разлом земной коры

DOI: 10.31857/S2686739723601126, **EDN:** LDPUJN

Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры является неотъемлемой частью поиска путей прогнозирования сейсмической опасности. Вместе с тем прямые инструментальные глубинные наблюдения, особенно на больших глубинах, сильно ограничены и носят единичный характер (скважина Паркфилд) [1]. Поверхностные наблюдения различными геофизическими [2, 3] и геодезическими [4–8] методами дают лишь косвенное представление о глубинных деформационных процессах. Попытки обнаружить предвестники сейсмических событий в прямых геодезических измерениях на земной поверхности не принесли существенных успехов [9], и, по-видимому, деформационные наблюдения на поверхности Земли не могут отразить особенности развития деформаций на глубине, связанных, например, с подготовкой крупных сейсмических событий [10, 11].

Одним из эффективных способов изучения динамики глубинных деформационных процессов является детальное геомеханическое моделирование тектонически-активных регионов с использованием данных о текущей сейсмичности

[12–16]. Настоящая работа выполнена на основе результатов мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС), полученных на геомеханической модели Южной Калифорнии, включающей детальную разломно-тектоническую структуру, текущую сейсмичность (рис. 1) и свойства земной коры, как это кратко описано ниже.

Модель позволяет проследить эволюцию напряженно-деформированного состояния (НДС)

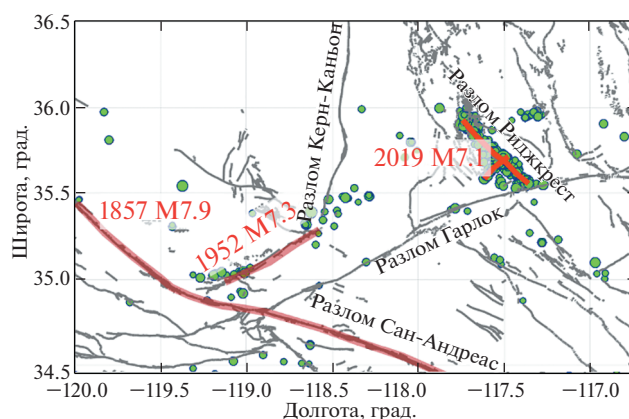


Рис. 1. Разломная тектоника (серые линии, база данных USGS) и сейсмичность (зеленые кружки, каталог ComCat) для фрагмента области моделирования. Бледно-коричневыми линиями показаны очаги наиболее сильных землетрясений в регионе по историческим данным. Очаги события Риджкрест 2019 г. и его форшока показаны ярко-красными линиями.

¹Научно-исследовательский институт “Аэрокосмос”
Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

*E-mail: alexeevgeo@gmail.com

Таблица 1. Значения геомеханических параметров (модель Мора-Кулона) для 6 латерально-однородных слоев, задаваемые на начальном этапе построения модели Южной Калифорнии (до учета поврежденности)

Слой модели	Модуль объемного сжатия, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Угол внутреннего трения, °	Сцепление, МПа	Плотность, кг/м ³
Слой 1 (L1) Верхняя кора	17.3	8	26	20	2600
Слой 2 (L2) Верхняя кора	19.5	9	30	35	2700
Слой 3 (L3) Средняя кора	16.2	7.5	27	32	2700
Слой 4 (L4) Средняя кора	14.5	6.7	25	29	2800
Слой 5 (L5) Средняя кора	11.9	5.5	24	26	2800
Слой 6 (L6) Нижняя кора	18.4	8.5	27	30	2800

рассматриваемой области земной коры. В плане область моделирования имеет размер 645×560 км ($31^\circ\text{--}36^\circ$ с.ш. и $114^\circ\text{--}121.2^\circ$ з.д.) и дискретизируется прямоугольной сеткой с элементами (ячейками) 5×5 км. Модель включает в себя пять слоев земной коры и литосферы, охватывая интервал глубин от дневной поверхности (с учетом рельефа) до 35 км; разбиение в вертикальном направлении увязано с геометрией границ слоев, задаваемых на основе имеющихся геологических данных. Каждому слою присвоены определенные значения геомеханических параметров в рамках упругопластической модели Мора-Кулона: модуль объемного сжатия K , модуль сдвига G , сцепление c и угол внутреннего трения ϕ (табл. 1).

Разломно-блоковая тектоника региона задается с использованием данных линейного анализа путем введения функции поврежденности, мультипликативно корректирующей (в сторону снижения прочности) значения указанных геомеханических свойств в соответствующих ячейках сетки с целью имитации ослабленных участков земной коры в каждом из слоев модели (см. карты параметров на рис. 2).

Функция поврежденности представляет собой нормированное пространственное распределение безразмерного параметра, принимающего значения в диапазоне (0, 1) и рассчитанного с использованием карт разломов, рельефа дневной поверхности и анализа спутниковых изображений.

На первом этапе геомеханического моделирования с использованием программного пакета FLAC3D выполняется расчет «стационарного» (начального) напряженного состояния модели, отражающего ее начальную поврежденность, связанную с разломно-блоковой тектоникой, учиты-

вающего собственный вес и действие региональных тектонических сил. На последующем этапе проводится учет текущей сейсмической активности, что реализуется в виде итерационной процедуры пересчета текущего состояния (НДС) модели. При этом происходит последовательная коррекция значений геомеханических свойств (модулей объемного сжатия, сдвига, сцепления и угла внутреннего трения) тех элементов (ячеек) модели, которые оказались затронуты сейсмическими событиями в трехмесячный временной интервал. Информация о сейсмических событиях заимствуется из каталога USGS ComCat (U.S. Geological Survey, ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (ComCat), <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>); учитываются все события, попадающие в область моделирования с магнитудами $M > 1$ за период в 3 мес, предшествовавших дате моделирования. При этом массив координат гипоцентров событий проецируется на сетку модели, а по их магнитудам определяются значения выделившейся энергии. Далее полученные распределения энергии сглаживаются и используются для вычисления скорректированных значений функции поврежденности, которая, в свою очередь, применяется для коррекции массива геомеханических параметров, с учетом залечивания земной коры. Последнее означает, что если в данной ячейке сетки не фиксируется новых землетрясений, то ее параметры возвращаются к исходным значениям за 4 мес. Наконец, скорректированная модель используется для расчета нового НДС, т.е. полного набора компонент тензоров напряжений и деформаций. После расчета результирующих значений параметров НДС описанный цикл по-

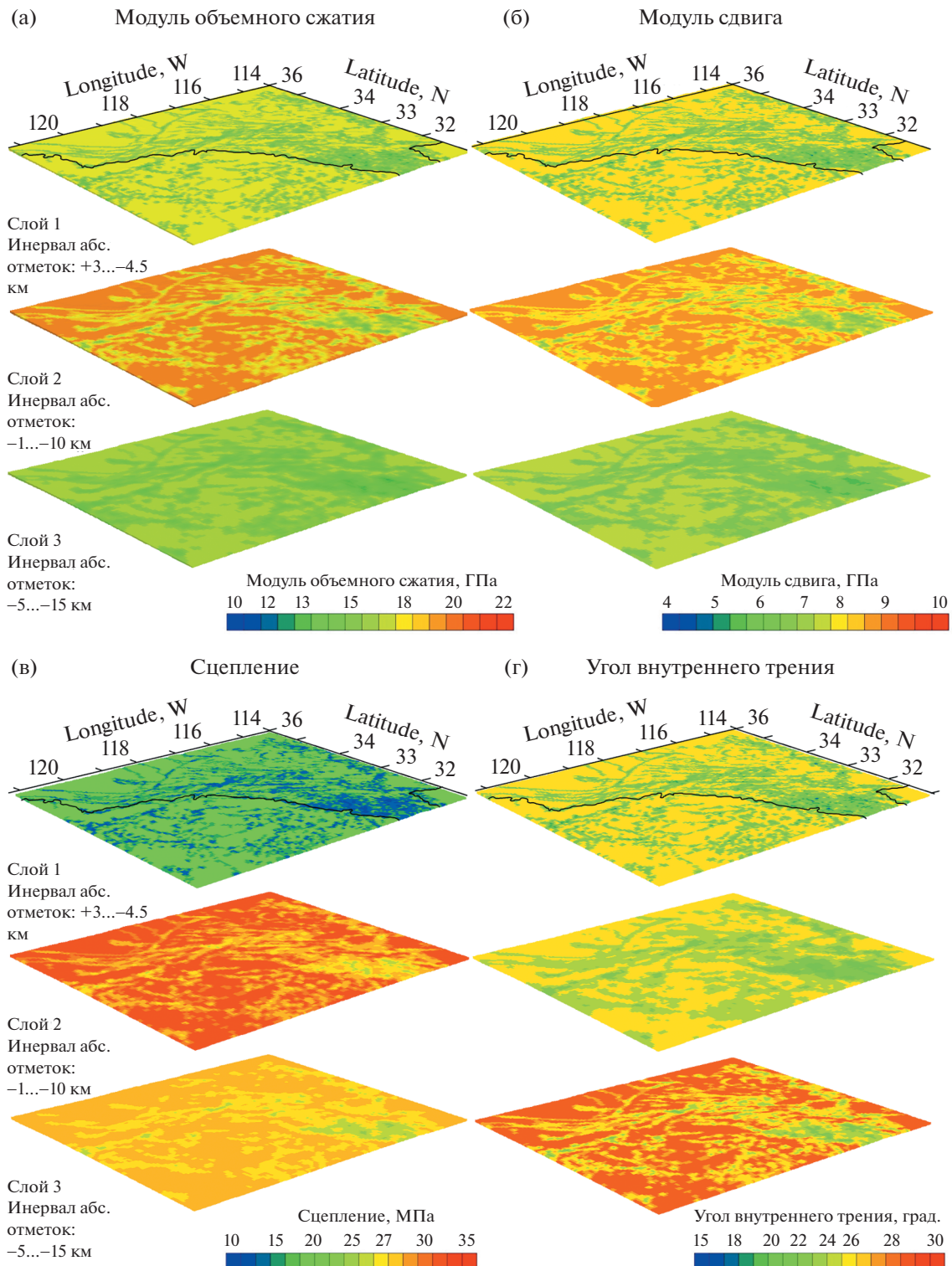


Рис. 2. Карты начальных распределений геомеханических параметров для трех верхних слоев модели: модуль объемного сжатия (а), модуль сдвига (б), сцепление (в) и угол трения (г). Неоднородности отражают разломную тектонику региона и получены с использованием функции поврежденности.

вторяется для нового трехмесячного интервала, сдвинутого на 0.5 мес относительно предыдущего.

В настоящей работе выявлен и описан единичный всплеск приращения глубинной сдвиговой деформации, который является основной частью

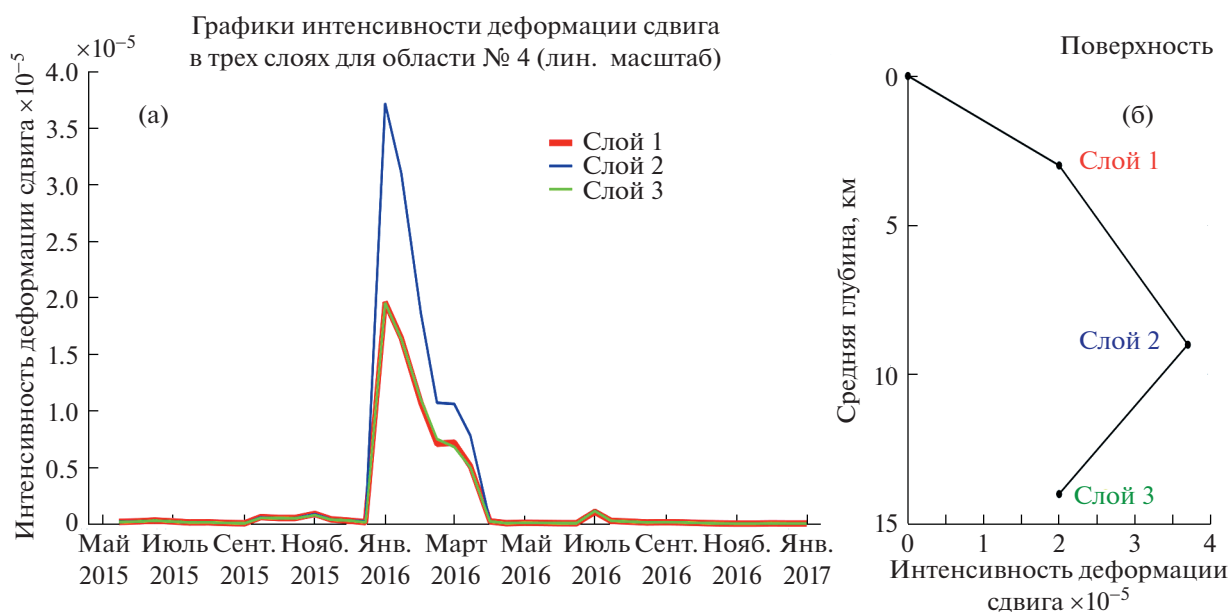


Рис. 3. Изолированный всплеск приращений сдвиговой деформации для слоев верхней и средней земной коры, рассчитанный в рамках геомеханической модели Южной Калифорнии по интервалам 0.5 мес с расчетами через каждые 0.5 мес (а) и распределение максимальной амплитуды всплеска по глубине (б).

всего деформационного процесса. Для анализа выбран типичный сейсмоактивный разлом Керн-Каньон, находящийся в непосредственной близости к западу от т.н. Восточно-Калифорнийской Сейсмоактивной Зоны (ECSZ) и являющийся северным меридиональным отрогом разлома Гарлок на долготе около 118 з.д. На рис. 3 а представлен всплеск интенсивности сдвиговой деформации (СД), выявленный на локальном участке разлома, а на рис. 3 б — распределение его максимальной амплитуды по глубине.

Уникальной особенностью такого всплеска является резкое возрастание амплитуды примерно на 2 порядка относительно фоновых значений (около 10^{-7}) до максимальных, достигающих 5×10^{-5} за временной интервал в 0.5 мес. Такие величины деформации на глубинах 8–10 км соответствуют смещениям порядка 0.5 м, и подобный процесс потенциально может являться отражением т.н. тихих землетрясений, не проявляющихся сейсмичностью и деформациями на поверхности Земли. Смещения масс среды такого объема и амплитуды имеют уровень энергии порядка 10^{16} – 10^{17} , что соответствует энергии, выделяющейся при землетрясениях с магнитудой порядка 3–4.

Данный всплеск можно назвать “Взрывным Квантом Глубинной Деформации” (ВКГД). Максимальная амплитуда ВКГД соответствует глубине порядка 10 км, т.е. той области, где в основном сосредоточена сейсмичность Южной Калифорнии. Подобные “кванты” не отражаются в деформационных измерениях на поверхности Земли и

возникают в модельных расчетах только при развитии глубинных деформационных процессов. Характерная длительность “кванта” составляет первые месяцы, а периоды отсутствия выраженных деформаций (периоды “затишья”) могут достигать нескольких месяцев, как это видно из рис. 4, где представлено пространственно-временное распределение данного ВКГД.

Как видно, “взрывные” приращения СД приурочены к участку разлома Керн-Каньон, имеют размеры порядка первых десятков километров и представляют фрагмент локального деформационного процесса на разломе в течение около трех месяцев, начиная с января 2016 г.

Это неотъемлемая составная часть всего процесса разрушения разлома, когда индикатором разрушения служит текущая сейсмичность, которая и приводит к таким резким возмущениям сдвиговых деформаций. В подтверждение данного положения на рис. 5 приведены распределения текущей сейсмичности за трехмесячные интервалы и связанные с ними приращения СД для всего разлома за 2018–2019 гг.

Видно, что ВКГД появляются тогда и там, когда отсутствует сейсмичность или имеется спад ее активности. Иными словами, деформация не накапливается там, где идет разрушение. В свою очередь, возникновение локальной деформации приводит к дальнейшему развитию текущей сейсмичности.

Это две стороны одного процесса разрушения земной коры под действием внешних тектониче-

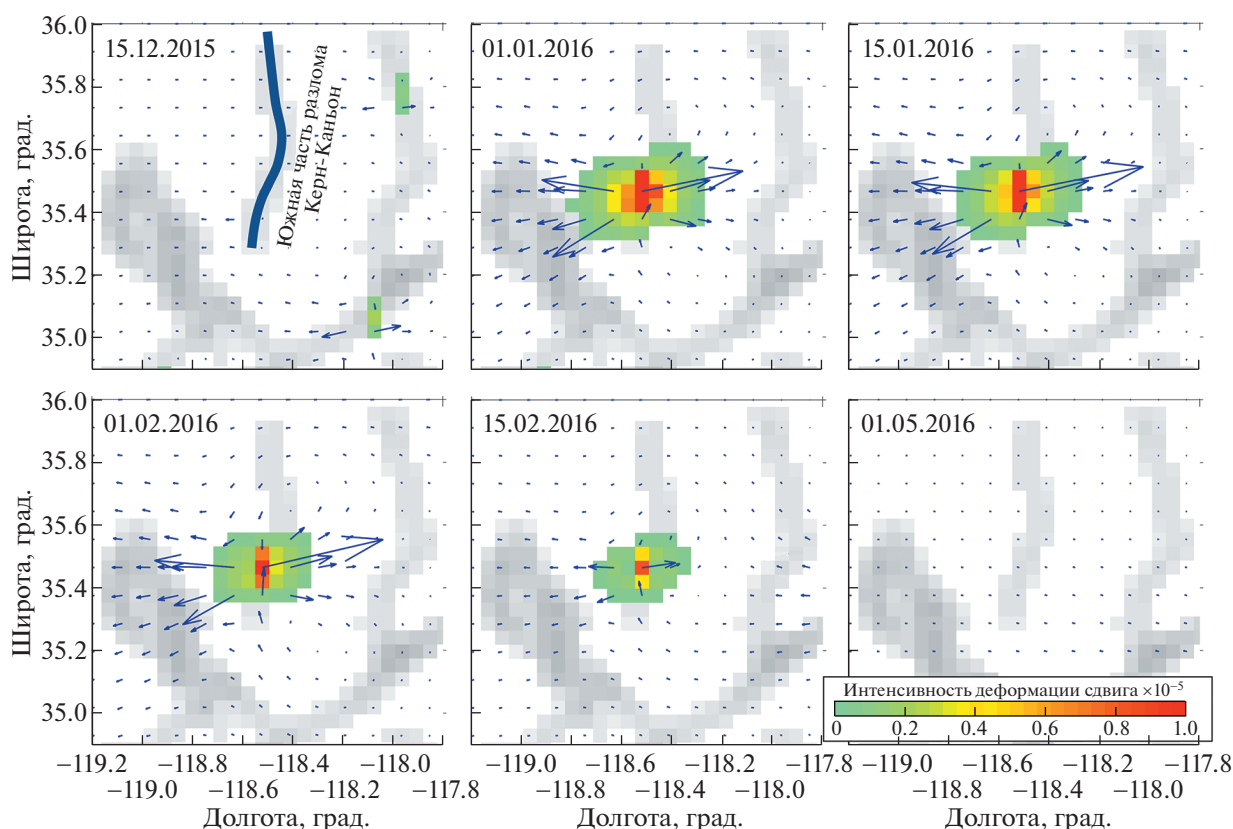


Рис. 4. Пространственное распределение локального всплеска приращений сдвиговой деформации на глубине порядка 10 км (слой 2 верхней коры) на участке разлома Керн-Каньон с 15.12.2015 г. по 01.05.2016 г.

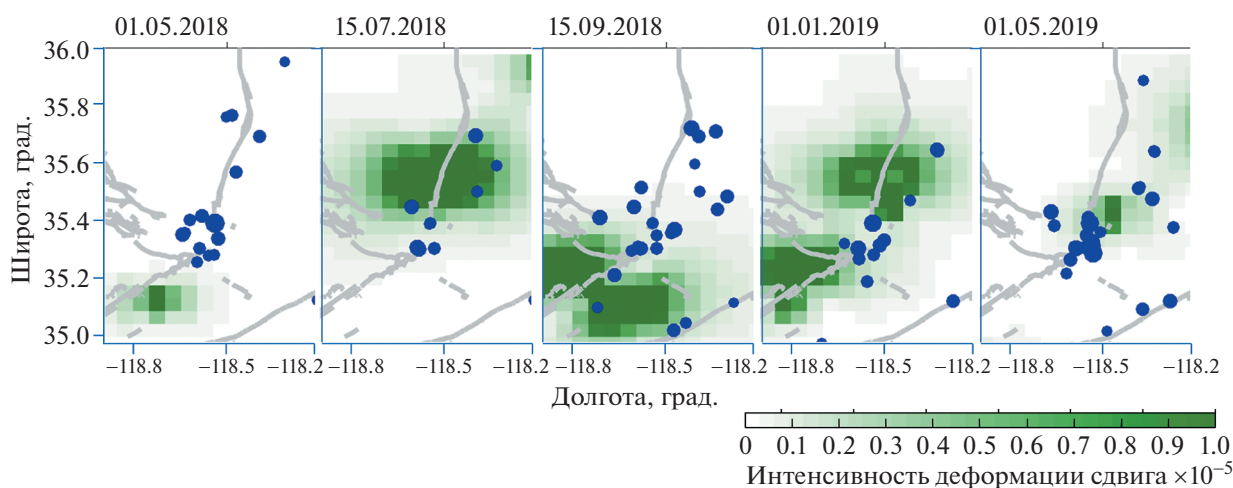


Рис. 5. Фрагмент цикла перераспределений текущей сейсмичности в 3-месячном интервале (землетрясения с магнитудой в соответствии с размерами синих кружков) и ВКГД (зеленые области) на глубине порядка 10 км для района разлома Керн-Каньон за 2018–2019 гг.

ских сил, когда происходит перераспределение сейсмической энергии и деформационной. Проведенные расчеты показывают, что характерные периоды таких перераспределений, как видно из

рис. 5, имеют продолжительность в несколько месяцев, а расстояния, на которых происходят такие взаимодействия, исчисляются величинами порядка 1–10 км.

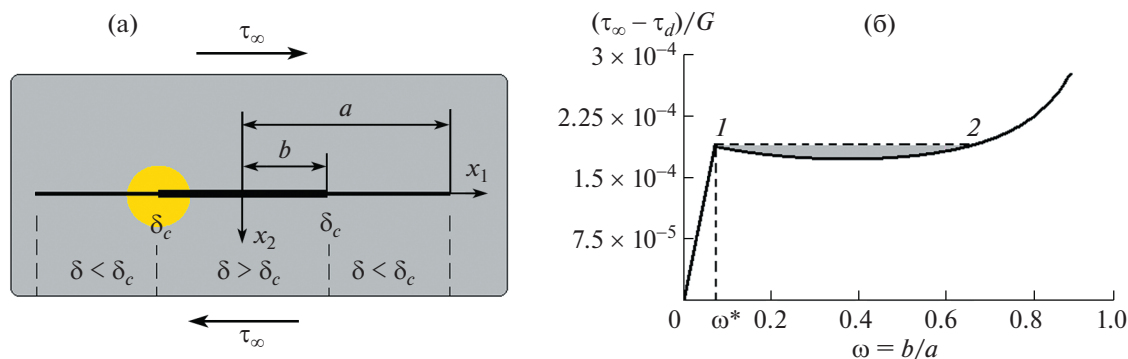


Рис. 6. Модель разлома (а) и график перехода разлома в новое состояние равновесия (б).

Данные выводы и оценки получены при анализе динамики напряженно деформированного состояния одного типичного сейсмоактивного разлома и, вообще говоря, должны быть дополнены обширным анализом взаимодействия сейсмичности и глубинных деформационных процессов на различных разломах Южной Калифорнии за длительные промежутки времени.

Всплески приращений глубинной сдвиговой деформации можно объяснить развитием самоподдерживающегося процесса неустойчивости и переходом разлома в новое несмежное состояние равновесия [17]. В результате накопление значительных перемещений и деформаций происходит без сейсмической активности, что характерно для тихих землетрясений. Эти события медленного проскальзывания длятся от недель до месяцев, по сравнению с секундами и минутами для землетрясений. Тихие землетрясения были открыты более двух десятилетий назад [18], когда в декабре 1992 г. два скважинных тензометра недалеко от разлома Сан-Андреас в Калифорнии зафиксировали событие медленной деформации продолжительностью около недели.

Для исследования перехода разлома в несмежную форму равновесия рассмотрим упругий слой с разрезом длиной $2a$, нагруженный на бесконечности сдвигающими усилиями τ_∞ (рис. 6 а). Напряжения, действующие в зоне разлома перед разрушением, заменим распределенными силами взаимодействия бортов разреза. Будем считать, что они распределены равномерно и уменьшаются от уровня τ_u до уровня остаточной прочности τ_d при критической деформации δ_c . Поэтому в наиболее нагруженной центральной части, где превышено значение δ_c , имеется область с шириной $2b$, где силы сухого трения равны τ_d , а вне этой зоны действуют силы τ_u . Решение задачи позволяет связать разность напряжений $(\tau_\infty - \tau_d)$ с размером трещины a , величиной $\omega = b/a$ и

скачком напряжений $(\tau_u - \tau_d)$ при заданном значении δ_c соотношением [17]

$$\frac{(\tau_\infty - \tau_d)}{G} = \frac{1}{2(1-\nu)\sqrt{1-\omega^2}} \times \left[\delta_c - 2 \frac{(1-\nu)(\tau_u - \tau_d)}{\pi G} \omega \ln \left(\frac{1}{\omega^2} \right) \right] + \frac{2(\tau_u - \tau_d)}{\pi G} \arccos \omega \quad (1)$$

Здесь G — модуль сдвига среды, ν — коэффициент Пуассона.

Анализ выражения (1) показывает, что увеличение зоны с пониженной прочностью происходит в режиме самоподдерживающегося процесса.

На рис. 6 б по формуле (1) при $G = 2 \times 10^{10}$ Па, $\tau_u = 8 \times 10^7$ Па, $\tau_d = 7.85 \times 10^7$ Па, $\nu = 0.2$, $\delta_c = 2 \times 10^{-4}$ построена кривая равновесных состояний разлома (сплошная черная линия). Любой из точек этой кривой соответствует некоторое состояние равновесия системы, характеризуемое парой значений $(\tau_\infty - \tau_d)/G$ и ω . Рассмотрим теперь монотонный процесс нагружения от нуля до состояния, характеризуемого точкой 1 при $\omega = \omega^*$ после чего должен произойти переход системы по пунктирной линии в точку 2. Область, выделенная серым цветом на рис. 6 б, соответствует выделяющейся при этом энергии. За точкой 2 увеличение ω будет уже происходить при возрастании нагрузки. В момент перехода в точку 2 накапливаются деформации, и скачок смещений $[u]$ на разломе длиной $2a = 10$ км достигает 0.5 м, что соответствует величинам, полученным для ВКГД (рис. 3).

Рассмотренная модель объясняет всплески деформации. Если на отдельных участках разлома воспроизводится ситуация, показанная на рис. 6, то можно сказать, что при $\omega \leq \omega^*$ происходит прорабатывание зоны разлома, требующее увеличения нагрузки τ_∞ , и сопровождающаяся сейсмической активностью при относительно небольших

деформациях. Если мы находимся в состоянии $\omega > \omega^*$, то процесс является самоподдерживающимся и сопровождается накоплением значительных перемещений без сейсмической активности, что характерно для тихих землетрясений. Полученные в настоящей работе количественные оценки свойств ВКГД и их взаимодействий с локальной текущей сейсмичностью дают новую информацию к пониманию глубинных процессов разрушения земной коры и дальнейшему развитию методов прогнозирования сейсмической опасности.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в НИИ “Аэрокосмос” в рамках проекта № 122011800095-3 и ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnston M.J.S., Borchardt R.D., Linde A.T., Gladwin M.T. Continuous Borehole Strain and Pore Pressure in the Near Field of the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California, Earthquake: Implications for Nucleation, Fault Response, Earthquake Prediction, and Tremor // *Bull. Seis. Soc. Amer.* 2006. V. 96. № 4B. P. S56–S72. <https://doi.org/10.1785/0120050822>
2. Hutton L.K., Woessner J., Hauksson E. Seventy-Seven Years (1932–2009) of Earthquake Monitoring in Southern California // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2010. V. 100. № 2. P. 423–446. <https://doi.org/10.1785/0120090130>
3. Clayton R.W., Heaton T., Kohler M., Chandy M., Guy R., Bunn J. Community Seismic Network: a dense array to sense earthquake strong motions // *Seismological Research Letters*. 2015. V. 86. P. 1354–1363. <https://doi.org/10.1785/0220150094>
4. Hudnut K.W., King N.E., Galetzka J.E., Stark K.F., Behr J.A., Aspiotes A., van Wyk S., Moffitt R., Dockter S., Wyatt F. Continuous GPS observations of postseismic deformation following the 16 October 1999 Hector Mine, California, earthquake (Mw7.1) // *Bull. Seis. Soc. Amer.* 2002. V. 92. № 4. P. 1403–1422.
5. Mazzotti S., Lucinda L., Cassidy J., Rogers G., Halchuk S. Seismic hazard in western Canada from GPS strain rates versus earthquake catalog // *J. Geophys. Res. (Solid Earth)*. 2011. V. 116. P. 12310. <https://doi.org/10.1029/2011JB008213>
6. Cenni N., Viti M., Mantovani E. Space geodetic data (GPS) and earthquake forecasting: examples from the Italian geodetic network // *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*. 2015. V. 56. № 2. P. 129–150.
7. Li S., Chen G., Tao T., He P., Ding K., Zou R., Li J., Wang Q. The 2019 Mw 6.4 and Mw 7.1 Ridgecrest earthquake sequence in Eastern California: rupture on a conjugate fault structure revealed by GPS and InSAR measurements // *Geophys. Journ. Int.* 2020. V. 221 № 3. P. 1651–1666. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa099>
8. Chen K., Avouac J.-P., Aati S., Milliner C., Zheng F., Shi C. Cascading and pulse-like ruptures during the 2019 Ridgecrest earthquakes in the Eastern California Shear Zone // *Nat. Comms.* 2020. V. 11. P. 22. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13750-w>
9. Klein E., Bock Y., Xu X., Sandwell D.T., Golriz D., Fang P., Su L. Transient deformation in California from two decades of GPS displacements: Implications for a three-dimensional kinematic reference frame // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2019. V. 124. № 12. P. 12189–12223.
10. Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Некоторые причины трудностей краткосрочного прогноза землетрясений и возможные пути решения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 46–50. <https://doi.org/10.31857/S268673972012004X>
11. Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А., Гапонова Е.В. Изучение формирования очага сильного землетрясения Риджкрест 2019 г. в Южной Калифорнии с использованием геомеханической модели // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 49–54. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020037>
12. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапишин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
13. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций на примере Южной Калифорнии // ДАН. 2016. Т. 466. № 5. С. 598–601. <https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
14. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120–132. <https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
15. Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A. Revealing Short-Term Precursors of the Strong M > 7 Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Frontiers in Earth Science*. 2020. P. 8: 571700. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
16. Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A. Features of the modelled stress-strain state dynamics prior to the M 7.1 2019 Ridgecrest earthquake in Southern California // *Rus. Journ. Earth Sci.* 2022. V. 22. P. ES5002.
17. Гарагаш И.А. Быстрые изменения напряженного состояния в зоне разлома с точки зрения механики систем с несмежными формами равновесия // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием “Триггерные эффекты в геосистемах”. 2017. Москва. С. 24.
18. Linde A.T., Gladwin M.T., Johnston M.J.S., Gwyther R.L., Bilham R.G. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault // *Nature*. 1996. V. 383. P. 65–68.

INTENSE QUANTUM OF THE DEFORMATION IN DEEP CRUST, AS SEEN FROM GEOMECHANICAL MODELING IN SOUTHERN CALIFORNIA

Academician of the RAS V. G. Bondur^a, M. B. Gokhberg^{a,b}, I. A. Garagash^{a,b}, and D. A. Alekseev^{a,b,c,#}

^a*Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “Aerocosmos”, Moscow, Russian Federation*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation*

[#]*E-mail: alexeevgeo@gmail.com*

In a detailed analysis of the local features of the stress-strain state within the framework of the geomechanical model of Southern California, a rapidly developing high-amplitude shear deformation anomaly was identified in the upper crustal interval (at depths of up to 10 km) – the so-called “intense deformation quantum” – with a maximum increase in deformation by two orders of magnitude within 0.5 month. Such “quanta” can be integral elements of the entire deep deformation process associated with seismicity. The paper discusses the quantitative characteristics of deep deformation “quanta” and the conditions for their occurrence.

Keywords: seismicity, deformation, quantum, stress state, faulting of the Earth’s crust