ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 502, № 2, с. 95–100

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 551.24.02:551.243

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ РИДЖКРЕСТ 2019 Г. В ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

© 2022 г.
Академик РАН **В. Г. Бондур[1,*], М. Б. Гохберг[1,2], И. А. Гарагаш[1,2], Д. А. Алексеев[1,2], Е. В. Гапонова[1]**

Поступило 13.10.2021 г.
После доработки 13.10.2021 г.
Принято к публикации 15.10.2021 г.

Представлен модельный анализ параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры в период, предшествующий землетрясению M = 7.1 Риджкрест 2019 г. в Южной Калифорнии. В рамках геомеханической модели с динамическим учетом текущей сейсмичности выявлены закономерности пространственно-временных распределений аномальных сдвиговых деформаций и показано, что формирование очага происходит как попеременное развитие разрушений на окончаниях будущего разрыва, которое проявляется в возникновении аномальной деформации “гантелевидной” формы. В отличие от предшествующих теоретических и лабораторных исследований, изучено последовательное развитие процесса во времени, которое до этого не рассматривалось. Установлено, что существенную роль в выделении зоны формирования очага играет анализ направлений вектора смещения. Показано, что очаг эффективно формируется только при стабилизации и близости этих направлений к направлению сдвига в очаге будущего землетрясения, определенного по результатам космического мониторинга.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, геомеханическая модель, напряженно-деформированное состояние, деформационные наблюдения, землетрясения, Южная Калифорния, Риджкрест

DOI: 10.31857/S2686739722020037

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов подготовки крупных сейсмических событий является важнейшей составляющей исследований, направленных на разработку методов краткосрочного прогноза землетрясений. Для выявления этих процессов предложен ряд подходов, включающих непрерывный мониторинг сейсмичности [1, 2], спутниково-геодезические измерения [3], космические методы мониторинга и линеаментный анализ [4], наблюдения за вариациями электромагнитных полей, а также атмосферных и ионосферных параметров [5–8] и ряд других.

Отдельное место занимают теоретические и лабораторные исследования по развитию трещин в массиве горных пород [9, 10]. В этих работах процесс развития трещины рассматривался как разрушение перемычки при начальных дефектах на ее концах. В работе [11] на основе анализа скоростей V_p и V_s показано, что примерно за 3 ч до Кроноцкого землетрясения на Камчатке на концах перемычки, соответствующей очагу, образуются аномальные касательные деформации “гантелевидной” формы.

В данной работе рассматривается формирование очага сильного землетрясения Риджкрест магнитудой M = 7.1, произошедшего 06.07.2019 в Южной Калифорнии и относящегося к кластеру Восточно-Калифорнийской Сдвиговой Зоны (ECSZ). Анализ выполнен на основе детальных расчетов распределений сдвиговой деформации (СД) и направлений вектора смещений в рамках геомеханической модели Южной Калифорнии при использовании данных по текущей сейсмичности согласно каталогу USGS. Выявленные закономерности в поведении этих параметров указывают на то, что возникновение аномальных сдвиговых деформаций на концах перемычки, соответствующей очагу землетрясения Риджкрест 06.07.2019 г. (M = 7.1), начало проявляться не за часы, а примерно за один год до события.

[1]*Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” Российской академии наук, Москва, Россия*
[2]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: office@aerocosmos.info*

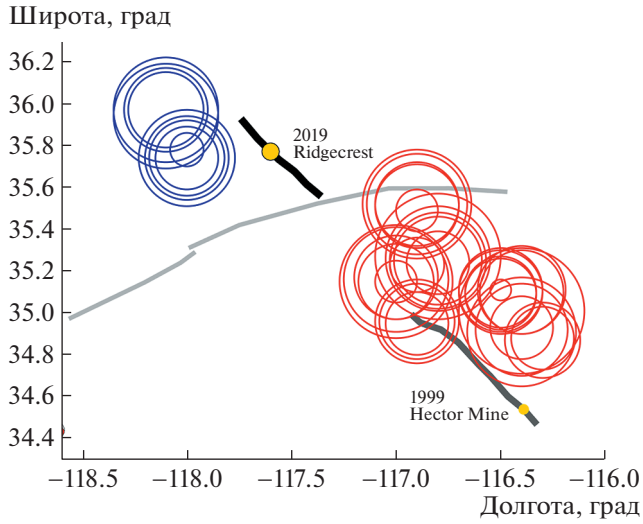

Рис. 1. Расположение и интенсивность аномалий деформации сдвига, наблюдаемых на юго-восточном (красные кружки) и северо-западном (синие кружки) продолжениях разлома Риджкрест в период с марта 2018 г. по июнь 2019 г.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты геомеханического мониторинга Южной Калифорнии, представленные в настоящей работе, опираются на трехмерную (3D) геомеханическую модель, подробно описанную в статьях [12–16]. Модель итерационно корректируется с учетом данных по накопленной (за трехмесячный временной интервал, предшествующий моменту расчета) локальной сейсмичности, используемых для вычисления “поврежденности” и последовательного перерасчета параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры с шагом по времени, составляющим 0.5 мес. Получаемая серия массивов параметров НДС используется для расчета и визуализации ключевых кинематических характеристик НДС – приращения вектора смещения, рассчитываемого во всех узлах сетки, а также интенсивности деформации сдвига (сдвиговой деформации – СД).

На рис. 1 приведено местоположение аномалий СД, которые последовательно появляются в эпицентральной зоне с интервалами 0.5 мес, начиная с 15 марта 2018 г. Размеры колец соответствуют пространственным размерам аномальных областей, оконтуренных по пороговому значению СД, составляющему 10^{-5}. Синим цветом отмечены аномалии СД на северо-западном окончании очага, а красным – на юго-восточном окончании, продолжением которого является область разрыва предыдущего землетрясения Гектор Майн 1999 г. M = 7.1, играющая, как видно, заметную роль в формировании данного очага.

В отличие от теоретических и лабораторных исследований, где не учитываются сдвиги во времени, появление аномалий СД на окончаниях будущего разрыва происходит при их последовательном чередовании с разных сторон с интервалами в несколько месяцев (рис. 2).

Аномалия СД находится на одном месте несколько месяцев, а затем происходит перераспределение на другую оконечность очага и обратно. Такая ситуация напоминает процесс раскачивания. Если пользоваться терминологией “качели”, то землетрясение произошло после пятого “качка”, который имел место за 5 дней до события, и который отличался от предыдущих наилучшим совпадением направлений вектора смещений с направлениями смещений в катастрофическом сдвиге и его окрестностях, полученными после события по данным спутникового мониторинга Sentinel-2 [17] (рис. 3б).

На рис. 3а приведено отклонение направлений горизонтальной составляющей смещения, рассчитанной для глубин 3–7 км, за 5 дней до события, от усредненного направления смещений земной поверхности по данным спутникового мониторинга после землетрясения. Интенсивные

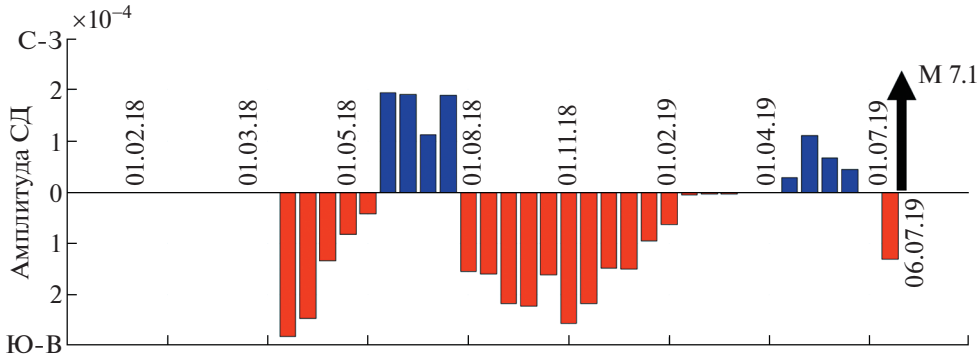

Рис. 2. Вариации интенсивности аномалий деформации сдвига, наблюдаемых на юго-восточном (красные столбики) и северо-западном (синие столбики) продолжениях разлома Риджкрест в период с марта 2018 г. по июнь 2019 г.

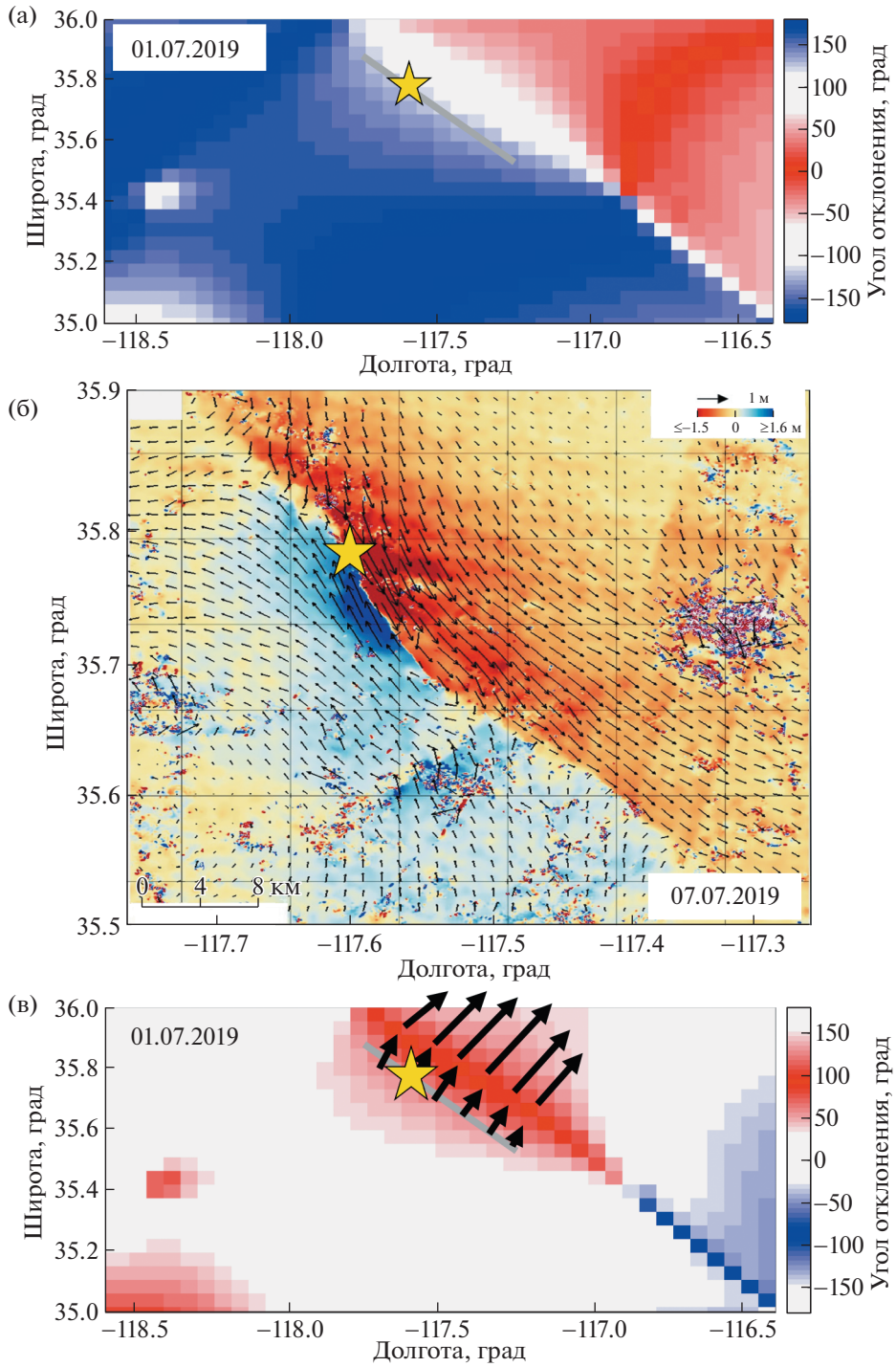

Рис. 3. (а) распределение отклонения смещений от тангенциального (вдоль разлома) направления по данным моделирования на 01.07.2019; (б) Карта поверхностных смещений в районе землетрясений Риджкрест по данным спутникового мониторинга Sentinel-2 за период 28 июня 2019–08 июля 2019, изменено из [17]; (в) распределение отклонения смещений от нормального (поперек разлома) направления по данным моделирования на 01 июля 2019. Черные стрелки иллюстрируют растяжение в направлении, близком к нормальному.

красный и синий цвета отвечают полному совпадению этих направлений по разным бортам разрыва, представляющего собой правосторонний сдвиг.

К этому же времени относится появление локальной зоны растяжения вдоль всего протяжения будущего очага (рис. 3в), что должно создавать дополнительные благоприятные условия для магистрального сдвига.

Исходя из приведенных результатов, можно, по всей видимости, заключить, что финальный

этап формирования очага произошел за 5 дней до события при последовательном раскачивании всей эпицентральной зоны в течение примерно одного года.

При этом существенную роль играли стабилизация и совпадение направления вектора смещений СД с направлениями сдвига в эпицентре события и его окрестностях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Постоянное разрушение земной коры под действием квазистационарных тектонических сил проявляется в текущей сейсмичности, которая в Южной Калифорнии приурочена в основном к магистральным сейсмообразующим разломам Сан-Андреас, Гарлок и Маунт [18]. На основании мониторинга НДС в рамках геомеханической модели с использованием текущей сейсмичности [15, 16], начиная с 2008 г. нами получены пространственно-временные распределения сдвиговой деформации (СД). Показано, что происходит постоянное пространственное перераспределение областей повышенной СД, которое при квазистационарном воздействии внешних тектонических сил определяется неоднородностью механических свойств ослабленных зон земной коры.

Фоновая миграция максимумов СД носит достаточно хаотический характер. С учетом временной дискретизации модельных расчетов НДС (с шагом 0.5 мес) оценка средней скорости миграции составляет приблизительно 10^2 км/месяц. При этом характерно отсутствие пространственной стабилизации максимумов СД. Пространственная стабилизация областей с повышенной СД на протяжении порядка месяцев, как выяснено, является одним из признаков готовящегося крупного события.

В работе [15] было показано, что при подготовке землетрясения Риджкрест максимальные СД начали проявляться в окрестности эпицентральной зоны примерно за 3 года до события. Однако формирование собственно очага начало эффективно развиваться примерно за 1 год, что выразилось в концентрации локальных максимумов СД вблизи оконечностей будущего разрыва (рис. 1). Появление ослабленных зон – дефектов на концах перемычки, отождествляемой с готовящимся разрушением, находит свое объяснение в работах по развитию трещин [10], где формирование разрыва рассматривается как разрушение перемычки между двумя полубесконечными трещинами или между зонами аномальной деформации. Отличие представленного в данной статье анализа от указанных работ состоит в том, что в последних не рассматривается пространственно-временная динамика дефектов.

При формировании очага Риджкрест миграция стала носить сугубо локальный характер на уровне размеров разрыва. Зоны аномально повышенной СД появляются с обеих сторон очага не одновременно, а происходит их последовательное чередование, напоминающее ситуацию так называемых “качелей” (рис. 2).

Стабилизация зоны максимальных СД в окрестности одного из окончаний очага продолжается до нескольких месяцев, а затем происходит сравнительно быстрое перераспределение (в пределах до 0.5 мес) к другому окончанию. Такая локальная миграция может быть объяснена на качественном уровне особенностями динамики механических свойств непосредственно в окрестности очаговой зоны.

Действительно, временное прекращение развития СД на одном из окончаний очага, так называемая зона затишья, находит свое объяснение в рамках известных моделей лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) и дилатантно-диффузионной концепции (ДД) [10]. Поскольку концы перемычки являются зонами концентрации напряжений, в их окрестности происходит интенсивное образование трещин, приводящее к падению порового давления и упрочнению земной коры. В данной области упрочнения наступает период отсутствия деформаций и при продолжающемся воздействии внешних тектонических сил происходит их перераспределение к другому окончанию очага с аналогичным сценарием развития НДС. По мере разрушения концов нагрузка на перемычку возрастает и скорость ее деформирования увеличивается. Быстрые изменения региональных тектонических усилий невозможны и поэтому разрушение связано с развитием ползучести в перемычке и переходом ее в заключительную неустойчивую стадию. Это течение ближе к идеальной пластичности, нежели к ньютоновской вязкости, и в пределе может рассматриваться как вязкопластическое течение с внутренним сухим трением. Критерием неустойчивости течения является утрата эллиптичности уравнений движения. Существует интервал скоростей основного течения, при которых уравнения возмущенного движения вязкопластической среды с внутренним сухим трением становятся гиперболическими и реализуются смежные формы равновесия, приводящие к разрушению [19, 20].

Из сказанного следует, что последовательное раскачивание очаговой зоны и связанное с этим ускорение течения в перемычке является, скорее всего, одним из необходимых условий начала магистрального разрушения.

Таким образом, в работе показана одна из эффективных возможностей по использованию геомеханических моделей и текущей сейсмичности для изучения особенностей формирования очага

крупного сейсмического события, что является новым шагом к решению проблемы краткосрочного сейсмического прогнозирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе с использованием геомеханической модели на примере сильного землетрясения Риджкрест магнитудой M = 7.1, произошедшего 06.07.2019 г. в Южной Калифорнии, показано, что формирование очага происходит как попеременное развитие разрушений на окончаниях будущего разрыва, которое проявляется в возникновении аномальной деформации “гантелевидной” формы.

Установлено, что существенную роль в выделении зоны формирования очага играет анализ направлений вектора смещения. Очаг эффективно формируется только при стабилизации и близости этих направлений к направлению сдвига в очаге будущего землетрясения, определенного по результатам космического мониторинга. Последовательное раскачивание очаговой зоны и связанное с этим ускорение течения в перемычке являются, скорее всего, одними из необходимых условий начала магистрального разрушения.

Таким образом, в работе продемонстрирована эффективность использования геомеханических моделей и данных текущей сейсмичности для изучения особенностей формирования очага крупного сейсмического события, что является новым шагом к решению проблемы краткосрочного сейсмического прогнозирования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта № АААА-А19-119081390037-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clayton R.W., Heaton T., Kohler M., Chandy M., Guy R., Bunn J.* Community Seismic Network: A Dense Array to Sense Earthquake Strong Motion // Seismol. Res. Lett. 2015. 86. P. 1354–1363. https://doi.org/10.1785/0220150094
2. *Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А.* Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53. https://doi.org/10.7868/S0002333717010021
3. *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.
4. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
5. *Gokhberg M.B., Morgounov V.A., Yoshino T., Tomizawa I.* Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan // Journal of Geophysical Research. 1982. V. 87. P. 7824.
6. *Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмо-электромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 180 с.
7. *Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // ДАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
8. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // ДАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
9. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Лабораторные и теоретические исследования процессов подготовки землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С. 107–122.
10. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестников землетрясений. В сб. Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С. 6–29.
11. *Гарагаш И.А.* Использование азимутальных вариаций скоростей сейсмических волн для мониторинга сейсмической опасности на Камчатке. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский, 2000. С. 164–175.
12. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин 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., 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
14. *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
15. *Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А.* Динамика напряженного состояния Южной Калифорнии по данным геомеханического мониторинга перед землетрясением 06.07.2019 г. с M = 7.1. Физика Земли. 2021. № 1. С. 3–23. https://doi.org/10.31857/S0002333721030042
16. *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 // Front. Earth Sci. 2020. 8:571700. https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700

17. *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 // Nature Comms. 2020. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13750-w
18. The San Andreas Fault System. California: U.S. Geological Survey. Professional Paper 1515. Wallace R.E. (Editor). 1990. Available at: https://pubs.usgs.gov/pp/1990/1515/pp1515.pdf (Accessed August 31, 2020).
19. *Гарагаш И.А., Николаевский В.Н.* Неассоциированные законы течения и локализация пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12. № 1. С. 131–183.
20. *Garagash I.A.* About the Instability of Viscoplastic Medium with Internal Friction. Proceedings of the 6th BIOT Conference on Poromechanics (BIOT-6), Paris, France, 2017. P. 1813–1818. https://doi.org/10.1061/9780784480779.224

THE STRONG 2019 RIDGECREST EARTHQUAKE IN SOUTHERN CALIFORNIA: STUDYING THE SOURCE FORMATION BASED ON GEOMECHANICAL MODELLING

Academician of the RAS V. G. Bondur[a,#], M. B. Gokhberg[a,b], I. A. Garagash[a,b], D. A. Alekseev[a,b], and E. V. Gaponova[a]

[a] *AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*
[b] *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[#] *E-mail: office@aerocosmos.info*

Here we present a simulation study of the crust's stress-strain state in the period of the 2019 Ridgecrest (M = 7.1) earthquake in South California. In the framework of the geomechanical model allowing for the current seismicity, the regularities of spatiotemporal distributions of anomalous shear deformations have been revealed. It is also shown that the source is being formed as an alternate development of fractures at the ends of the future rupture, which manifests itself in the occurrence of an anomalous deformation of a "dumbbell" shape. Unlike previous theoretical and lab studies, here we study the consistent temporal development of the process which had not been considered before. It has been found that the analysis of the displacement vector's directions plays a significant role in the identification of the zone of the source formation. The source is effectively formed only when these directions are stabilized and close to the direction of shear in the source of a future earthquake, determined from the results of satellite monitoring.

Keywords: earthquake forecast, geomechanical model, stress-strain state, strain observations, earthquake, South California, Ridgecrest