

РАННИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ В ДИНАМИКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ

© 2021 г. В. Г. Бондур^{1,*}, М. Б. Гохберг^{1,2}, И. А. Гарагаш^{1,2}, Д. А. Алексеев^{1,2,3,4}

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”,
г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 19.11.2020 г.

После доработки 26.12.2020 г.

Принята к публикации 03.03.2021 г.

Анализ напряженно-деформированного состояния перед землетрясением Риджкrest $M = 7.1$ в Южной Калифорнии проводится по пространственно-временному распределению сдвиговых деформаций, вычисляемых в геомеханической модели по локальным участкам земной коры размерами порядка 100×100 км на глубине 3–7 км. В эпицентральной зоне за три года до события обнаружен последовательный ряд промежутков времени вплоть до момента землетрясения, когда полностью отсутствуют сдвиговые деформации и породы максимально удалены от предела прочности – так называемые зоны “затишья”. Проанализировано пространственное распределение сдвиговых деформаций в окружающем эпицентральной зоне пространстве во времена затишья и последующих всплесков максимальной амплитуды в самой эпицентральной зоне. Такие промежутки времени названы “экскурсами”. Последовательное возникновение максимумов амплитуды сдвиговых деформаций в эпицентральной зоне и окружающем пространстве в периоды экскурсов соответствует ситуации “качелей”, когда вся область подготовки вплоть до события испытывает раскачивание. Проводится обсуждение по связи с существующими теоретическими моделями подготовки землетрясения.

Ключевые слова: геомеханическая модель, сдвиговая деформация, землетрясение, экскурсии, напряженно-деформированное состояние, Южная Калифорния.

DOI: 10.31857/S0002333721040049

ВВЕДЕНИЕ

Краткосрочные предвестники землетрясений – это одно из наиболее важных звеньев при возможном прогнозе землетрясений. В литературе этой проблеме уделено достаточно внимания [Гохберг и др., 1985; Соболев, Любушин, 2006; Regesan et al., 2015]. Важную роль в регистрации краткосрочных предвестников значительных сейсмических событий (с магнитудами $M > 6$) играют космические методы, позволяющие выявлять аномалии различных геофизических полей на больших территориях, в том числе геодинамические аномалии, проявляющиеся в деформации систем линеаментов [Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; 2007] и смещениях земной поверхности [Cenni et al., 2015], вариации ионосферных параметров [Бондур, Смирнов, 2005; Бондур и др., 2007], тепловые

аномалии [Ouzounov et al., 2007] и другие проявления, возникающие в процессе подготовки и протекания землетрясений. Вместе с тем, трудности прогноза связаны в основном с отсутствием надежных краткосрочных предвестников [Geller, 1997; Короновский и др., 2019].

В работе [Бондур и др., 2020б] высказана одна из возможных причин этих трудностей, связанная с тем, что аномалии различных параметров деформационной природы при процессе подготовки землетрясения приурочены к глубинным слоям земной коры, где концентрируется вся сейсмичность, а на поверхности их проявление оказывается существенно слабее. Предлагается один из возможных путей решения на основе геомеханического моделирования с использованием данных по текущей локальной сейсмичности.

Созданная авторами геомеханическая модель Южной Калифорнии [Бондур и др., 2007; 2010; Bondur et al., 2017] позволяет проводить мониторинг динамики напряженно-деформированного состояния (НДС) с использованием данных по локальной текущей сейсмичности (каталог USGS <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>) и выделять краткосрочные предвестники сильных землетрясений [Бондур и др., 2020а; 2021; Bondur et al., 2020]. Наиболее информативными являются вариации приращений сдвиговых деформаций (СД), а также параметра D , отражающего степень близости пород к пределу прочности, рассчитанные в модели на временном промежутке 0.5 мес. Используемый в работе термин “сдвиговая деформация” соответствует именно приращениям сдвиговой деформации, а не абсолютным значениям, накопленным за весь период геомеханического мониторинга.

В работе [Бондур и др., 2016] показано, что имеется широкомасштабное взаимодействие тектонически различных провинций Южной Калифорнии – северной и южной, разделенных по широте примерно на 34-м градусе. Северная провинция обладает достаточно сложным строением, связанным с сочленением разлома Сан-Андреас и субширотных разломов Гарлок и Моунт, а южная – относительно простым строением, связанным с разломом Сан-Андреас. Показано, что при наличии сдвиговых деформаций в северной провинции в южной практически отсутствуют аномалии напряженно-деформированного состояния. С другой стороны, при отсутствии СД на севере, на юге начинают резко накапливаться напряжения и породы земной коры становятся максимально приближенными к пределу прочности.

В данной работе исследование взаимодействий при динамике деформационного процесса продолжено детально на более локальных областях геомеханической модели. Землетрясение Риджкрест 2019 г. с $M = 7.1$ произошло в сложной в тектоническом отношении северной провинции, в отличие от землетрясения Баха Калифорния 2010 г. с $M = 7.2$. В работе [Бондур и др., 2021] показано, что для выявления краткосрочного предвестника данного события более эффективно проводить анализ динамики НДС в локальном окне модели северной провинции непосредственно вблизи эпицентра, что и будет принято за основу при обсуждении нижеприведенных результатов.

АНАЛИЗ АНОМАЛИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПЕРИОД 2016–2019 гг.

В настоящей работе для выявления детальных пространственных особенностей и взаимодей-

ствий в динамике НДС вся область моделирования разделена на 25 окон от А1 до Е5 (рис. 1). В каждом окне размером порядка 100×100 км содержится 400 ячеек (элементов дискретизации) модели 5×5 км. Эпицентральная зона (ЭЗ) землетрясения Риджкрест 06.07.2019 г. приходится на окно С1.

На рис. 2а, 2б приведены графики максимальных значений приращений сдвиговых деформаций (СД) на временном промежутке 0.5 мес. в окне С1 и В2 с ноября 2012 по август 2019 гг., а на рис. 2в в окне С1 на интервале с 01.05.2016 по 01.08.2019 гг. показан график параметра D (приближение к пределу прочности) во втором слое верхней земной коры (3–7 км), к которому приурочена практически вся сейсмичность рассматриваемой территории. Начиная с мая 2016 г. обнаруживается ряд характерных временных промежутков затишья, когда никаких значимых сдвиговых деформаций не наблюдается, и породы максимально удалены от предела прочности. Такая ситуация наблюдается в основном в ЭЗ в окне С1, а также, в меньшей степени, в окнах D1, D2, В1. В то же время на большем удалении от ЭЗ в других окнах (В2, С3, D3, С4, D4) подобные характерные затишья отсутствуют; вместо этого наблюдаются непрерывные вариации СД (рис. 2б). В других окнах отмечается слабая проявленность СД, либо полное их отсутствие.

Таким образом, примерно за 3 года до анализируемого сейсмического события в районе ЭЗ обнаружены последовательные чередования промежутков времени “затишья” (СД отсутствуют, породы удалены от предела прочности) и резкого возрастания амплитуды СД с максимальным приближением пород к пределу прочности. Такие процессы в зоне подготовки землетрясения могут быть названы “экскурсами НДС”, когда после периода “затишья” породы максимально приближаются к пределу прочности и испытывают значительные сдвиговые деформации, что, однако, не приводит к катастрофическому событию, а впоследствии вновь сопровождается релаксацией (возвращением к очередному “затишью”).

Перед землетрясением Риджкрест можно выделить 5 экскурсов, отмеченных на рис. 2 цифрами; их анализу и будет посвящено нижеприведенное изложение. Анализ проводится по вариациям СД по окнам модели; основное внимание уделяется закономерностям пространственного распределения НДС в периоды затишья и последующих всплесков активности, что является важным звеном в понимании процесса подготовки землетрясения. На серии рис. 3–рис. 8 схематично приведены контуры аномалий СД в слое 2 верхней земной коры на глубине 3–7 км для набора характерных моментов затишья вне ЭЗ и во время последующих максимумов СД внутри ЭЗ.

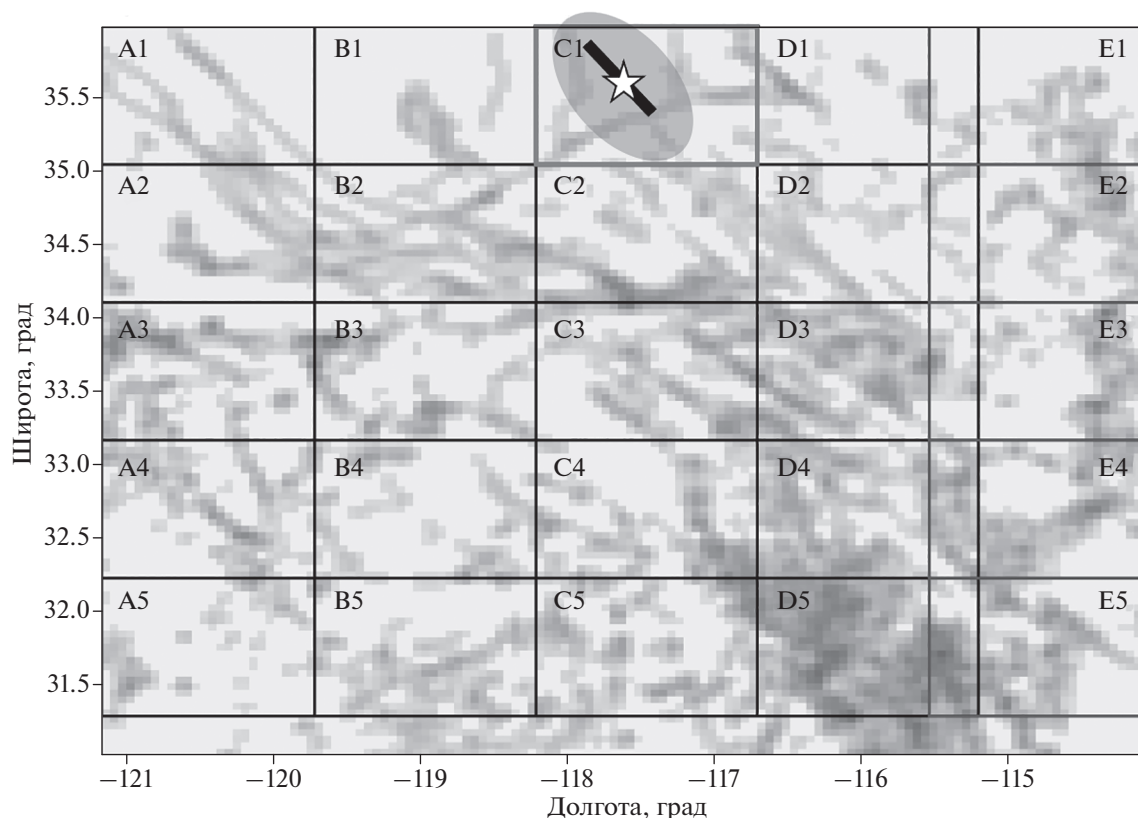


Рис. 1. Разбиение на окна области моделирования для Южной Калифорнии. Градациями серого показано начальное распределение поврежденности, ассоциированной с разломной тектоникой. Область внутри овала соответствует территории с балльностью 6–8. Звездочкой показан эпицентр землетрясения, черной линией – примерные размеры и ориентация поверхности вспарывания.

Экскурс 1. Перед данным экскурсом, начиная с ноября 2012 г., амплитуда вариаций СД сохраняется на уровне 1×10^{-4} . После некоторого спада в ноябре 2014 по март 2015 гг., амплитуда вариаций увеличивается, но затишья не наблюдается.

На рис. 3а представлено пространственное распределение приращения СД в период затишья в мае 2016 г. Видно, что зона максимальных СД концентрируется к югу (окно С2 с максимумом 3×10^{-4}) в непосредственной близости от области затишья в эпицентральной зоне (ЭЗ) в окне С1 (помечено звездочкой). После данного затишья в ЭЗ происходит резкое увеличение амплитуды СД до значения 5.2×10^{-4} (это наивысшее значение СД за весь период). Из рис. 3б видно, что зона максимальных СД концентрируется только в ЭЗ (окно С1) с резким спадом на изолинии 2.6×10^{-4} . Экскурс 1 – это максимальный по амплитуде и “пространственной концентрации” СД экскурс в ЭЗ.

Экскурс 2. Аномальное, наиболее длительное затишье в сдвиговых деформациях и параметре D занимает промежуток времени порядка 8 мес. с октября–ноября 2016 г. по май–июнь 2017 г. (рис. 2а, 2в). На рис. 4а приведено простран-

ственное распределение СД для промежутка времени в феврале 2017 г., когда наблюдаются максимальные амплитуды 4×10^{-4} вне зоны затишья. Видно, что область максимальных СД сконцентрирована в непосредственной близости к юго-западу от ЭЗ с изолинией на 2×10^{-4} . В период такого длительного затишья породы ЭЗ, вообще говоря, должны испытывать воздействие со стороны близлежащих СД относительно большой амплитуды. В результате такого воздействия в июле 2017 г. в ЭЗ породы резко приближаются к пределу прочности и начинают испытывать существенные СД за минимально короткий в модели промежуток времени 0.5 мес. (рис. 2а).

На рис. 4б приведено пространственное распределение СД во время максимальной активизации ЭЗ 01.07.2017 г. Видно, что активизация СД присуща только ЭЗ с максимумом на 2.8×10^{-4} и резким убыванием в окружающем пространстве на уровне изолинии 1.7×10^{-4} . ЭЗ, по-видимому, близка к событию, но землетрясения не произошло, а в начале 2018 г. наступил новый период затишья (рис. 2а), и такое поведение повторялось

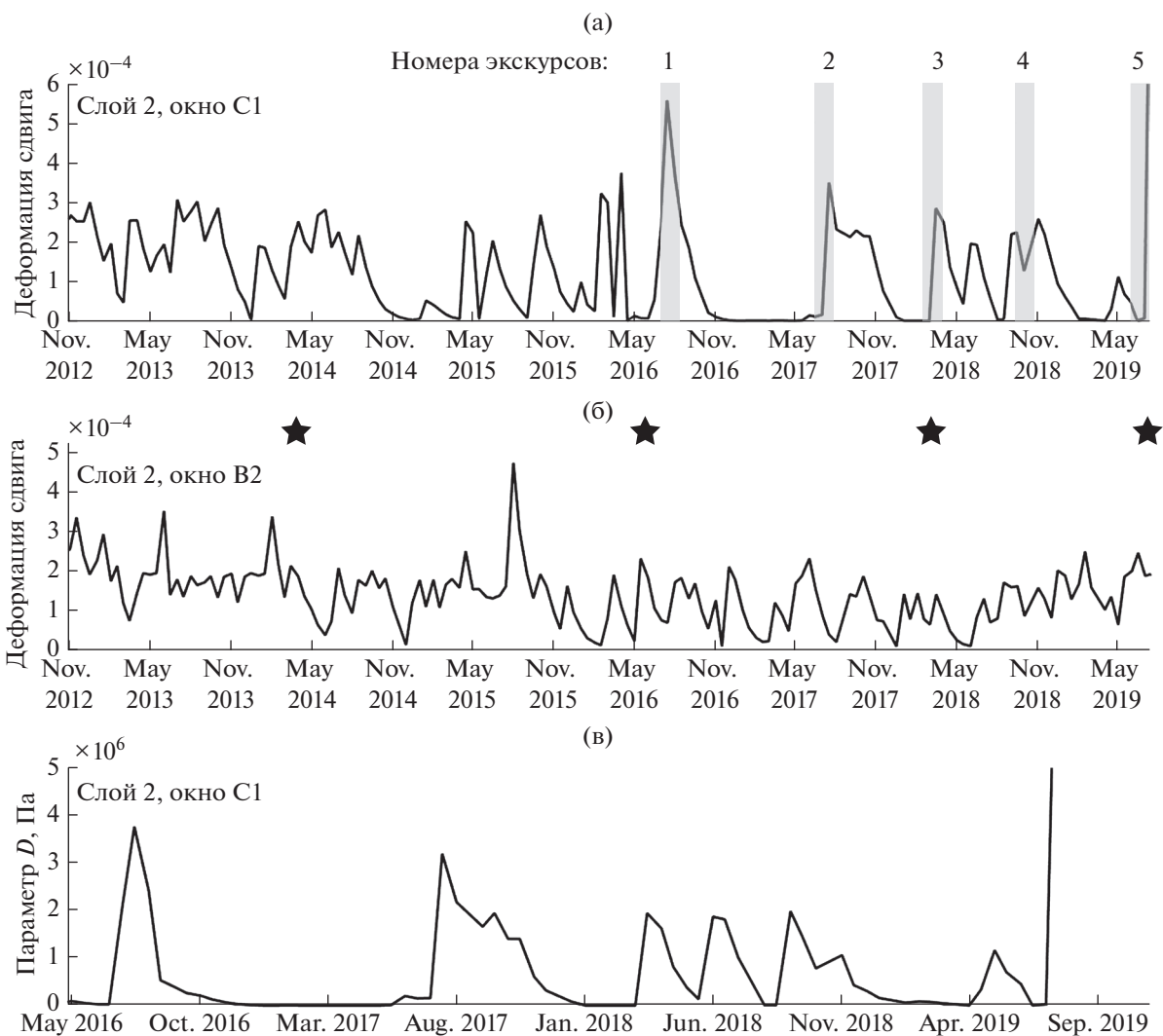


Рис. 2. Вариации параметров напряженно-деформированного состояния по результатам геомеханического моделирования: (а) – графики максимальных деформаций сдвига (СД) в окне С1 (ЭЗ). Цифрами в верхней части обозначены номера экскурсов; (б) – графики максимальных деформаций сдвига (СД) в окне В2; (в) – вариации максимума параметра D в окне С1 (ЭЗ). Черными звездочками показаны моменты землетрясений $M > 5$, произошедших в пределах области моделирования.

еще 3 раза вплоть до самого землетрясения Риджкrest 06.07.2019 г.

Экскурс 3. На рис. 5а дано аналогичное распределение СД для периода затишья 01.02.2018 г. Максимум СД (2×10^{-4}) находится к югу от ЭЗ, в непосредственной близости от нее (окно С2). Из рис. 5б видно, что резкое увеличение амплитуды СД до 2.8×10^{-4} приходится в основном на ЭЗ. Вместе с тем, слабый максимум 1.7×10^{-4} появляется к юго-востоку от ЭЗ на разломе Сан-Андреас в окнах D3, D4.

Экскурс 4. Максимумы СД на 01.08.2018 г. располагаются вокруг зоны затишья в ЭЗ (к западу в В1 1.2×10^{-4} , к востоку в D1 1.6×10^{-4} и к юго-востоку вдоль разлома Сан-Андреас в окне D5 1.7×10^{-4}).

Расположение максимумов СД вокруг продолжающейся зоны затишья на 15.08.2018 г. дано на рис. 6а, и оно оказывается аналогично предыдущему, со сравнительно большими амплитудами. Распределение аномального увеличения амплитуды СД после затишья представлено на рис. 6б. Кроме максимума в ЭЗ (2.2×10^{-4}) выделяется максимум 1.8×10^{-4} к югу в окнах В5, С5, D5. Таким образом, в экскурсе 4 наблюдается пространственное расширение как зоны СД вокруг затишья, так и самого максимума СД.

Экскурс 5. На период затишья 01.03.2019 г. появляются 2 максимума к юго-западу от ЭЗ в окнах А2, В2 (1.6×10^{-4}) и к юго-востоку на южной оконечности разлома Сан-Андреас в окнах С5, D5 (рис. 7а). Последний перед землетрясением Ри-

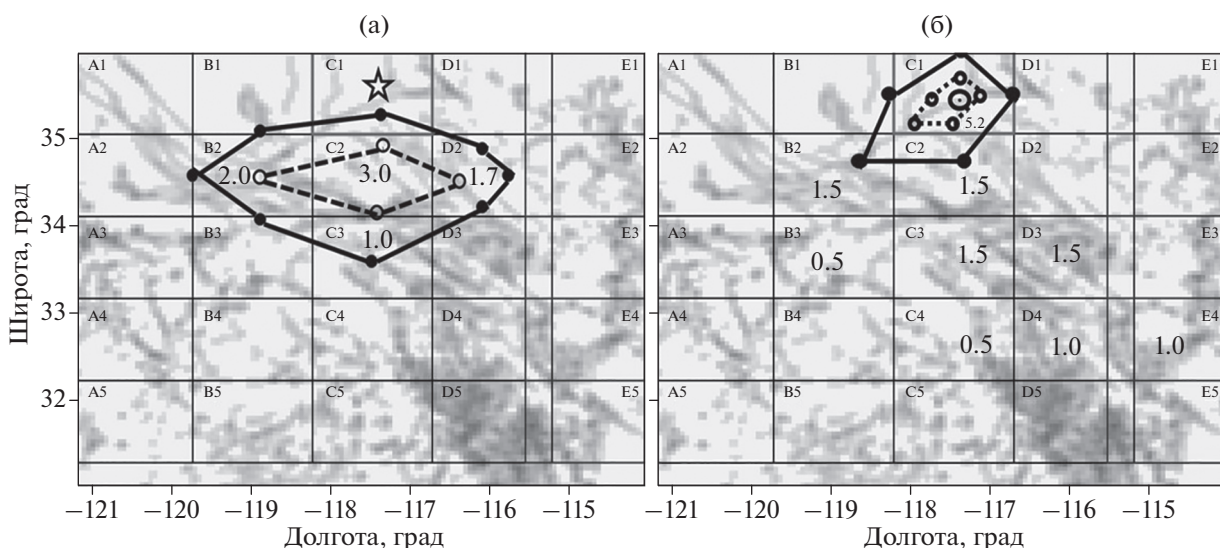


Рис. 3. Экскурс 1. Контуры аномалий сдвиговой деформации (СД): (а) – затишье, май 2016 г. (сплошная изолиния на 1.0×10^{-4} , пунктир на 2.0×10^{-4} , максимум 3.0×10^{-4} в окне С2); (б) – аномалия СД 01.07.2016 (сплошная изолиния на 2.6×10^{-4} , пунктир на 4.0×10^{-4} , максимум 5.2×10^{-4}).

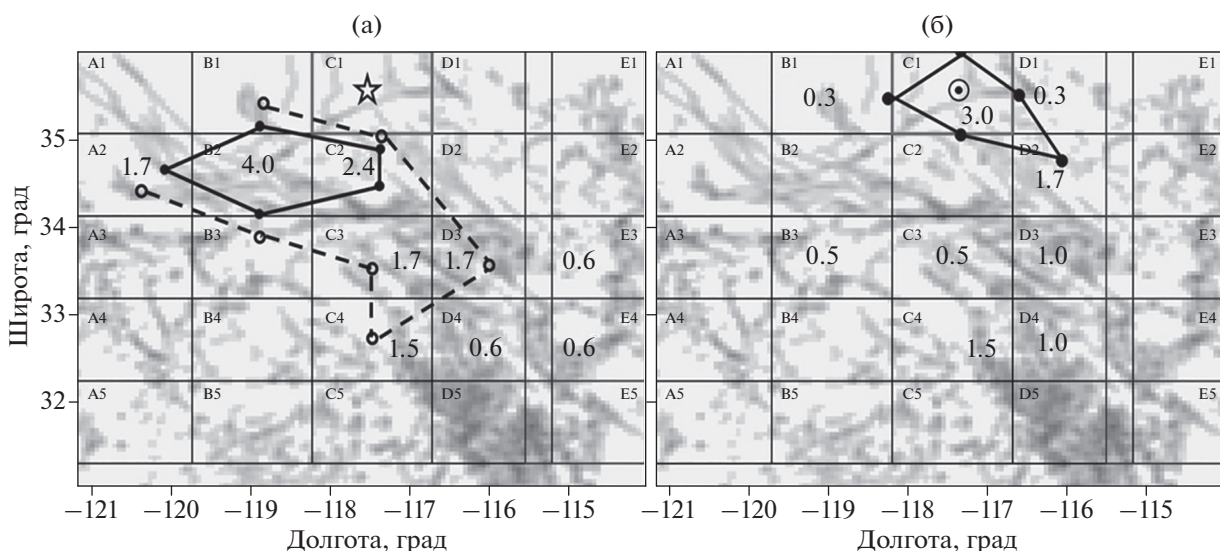


Рис. 4. Экскурс 2. Контуры аномалий сдвиговой деформации (СД): (а) – затишье, февраль 2017 г. (сплошная изолиния 2.0×10^{-4} , пунктир 1.5×10^{-4} , максимум 4.0×10^{-4} в окне В2 на ЮЗ); (б) – аномалия СД 01.07.2017 г. (сплошная изолиния на 1.5×10^{-4} , максимум 3.0×10^{-4}).

джкрест всплеск СД, описанный в статьях [Бондур и др., 2020б; 2020в], несмотря на сравнительно малую амплитуду 1×10^{-4} , имеет наибольшие пространственные размеры. Кроме максимума в ЭЗ, активизация СД проявляется вдоль всей протяженности разлома Сан-Андреас от А1 до Е5 (рис. 7б; такая же ситуация имеет место в процессе подготовки землетрясения Баха Калифорния 2010 г.)

Следует отметить, что подобные протяженные области активизации СД отвечают размерам зоны подготовки землетрясения с $M = 7$.

Во время затишья непосредственно перед событием, 15.06.2019 г. и 01.07.2019 г. аномалии СД в окружении ЭЗ были большой амплитуды ($2-3 \times 10^{-4}$), с существенно измененным пространственным распределением. На затишье 15.06.2019 г. (рис. 8а) размер аномальной зоны СД покрывает в модели

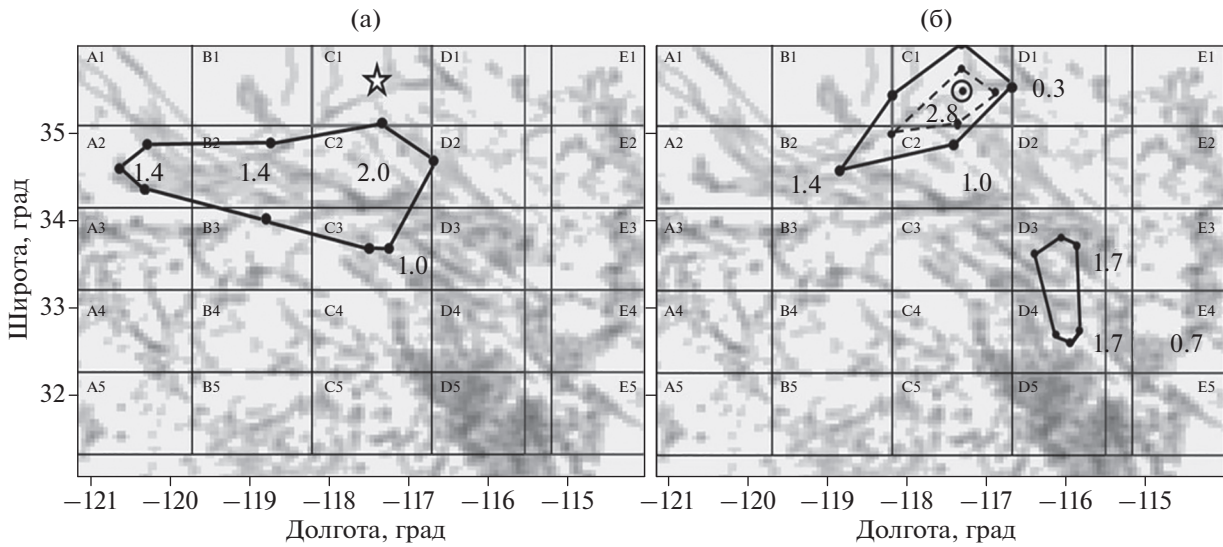


Рис. 5. Экскурс 3. Контуры аномалий сдвиговой деформации (СД): (а) – затишье 01.02.2018 г. (сплошная изолиния на 1×10^{-4} , максимум 2×10^{-4} в С2 на Ю); (б) – аномалия СД 15.03.2018 г. (сплошная изолиния на 1.4×10^{-4} , максимум 2.8×10^{-4} в С1 – ЭЗ, пунктир на 2.0×10^{-4}).

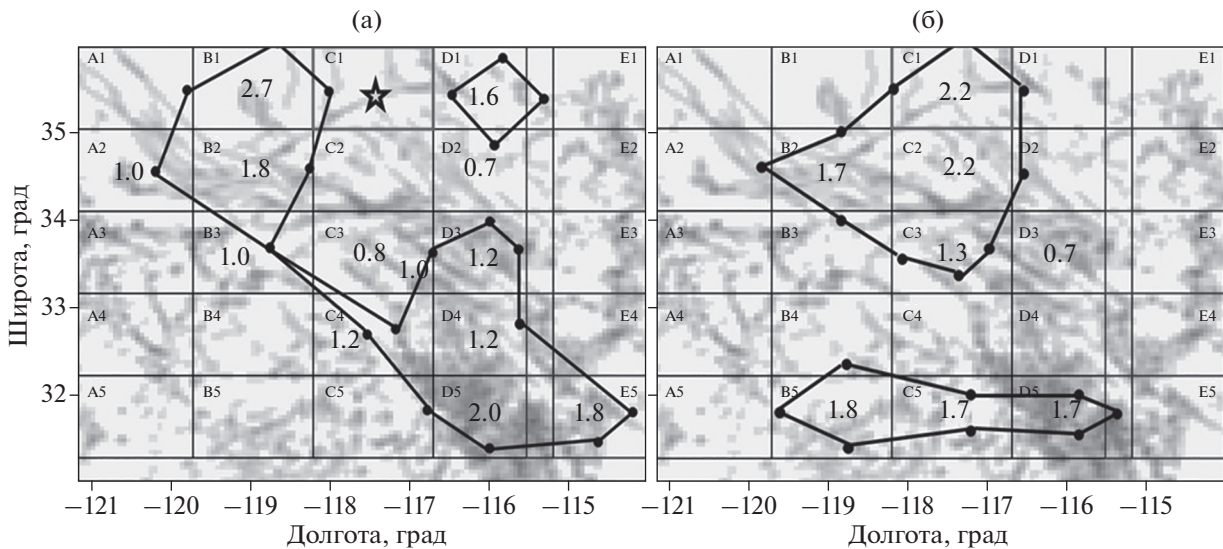


Рис. 6. Экскурс 4. Контуры аномалий сдвиговой деформации (СД): (а) – затишье, 15.08.2018 г. (сплошная изолиния на 1×10^{-4} , максимумы 2.7×10^{-4} в В1 к З, 2.0×10^{-4} в D5 к ЮВ, 1.6×10^{-4} в D1 к В); (б) – амплитуда СД 01.09.2018 г. 2.2×10^{-4} (сплошная изолиния на 1×10^{-4} , максимумы 2.2×10^{-4} в С1 и С2 к Ю, 1.8×10^{-4} в В5, С5, D5 на Ю).

всю длину разлома Сан-Андреас с максимумами в юго-восточной и северо-западной его оконечностях и амплитудами 2.7×10^{-4} и 2×10^{-4} соответственно. На 01.07.2019 г. (рис. 86), т.е. за 5 дней до события, пространственное распределение СД аномально меняет свою конфигурацию.

Максимум с амплитудой 3×10^{-4} появляется вне зоны разлома Сан-Андреас, фактически с другой (восточной) стороны от ЭЗ. Следует предположить, что подобное распределение СД созда-

ет возможно более предпочтительное, чем в другие экскурсии, воздействие на ЭЗ, которая как бы охватывается со всех сторон. При этом максимальная амплитуда СД находится на продолжении будущего очага примерно в 100 км от его юго-восточной оконечности. В этом, возможно, и состоит одно из искомых отличий предвестника непосредственно перед событием.

Для затишья на 01.07.2019 г., за 5 дней до события, рассчитано пространственное распределение амплитуд и направлений вектора смещений

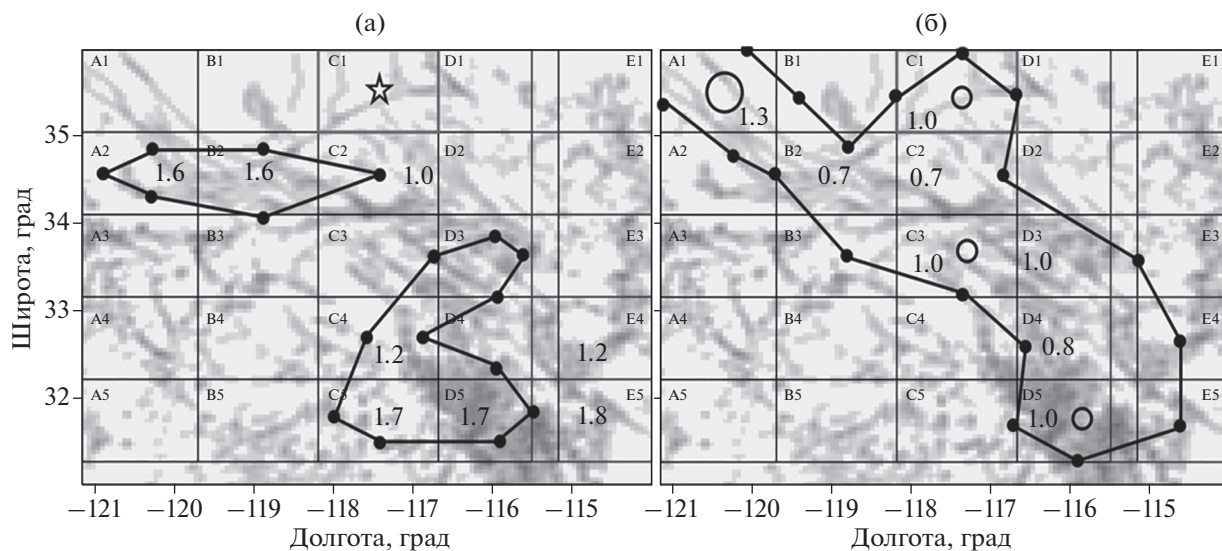


Рис. 7. Экскурсе 5. Контуры аномалий сдвиговой деформации (СД): (а) – затишье СД 01.03.2019 г. (сплошная изолиния на 1×10^{-4} , максимумы 1.6×10^{-4} в А2, В2 к ЮЗ, 1.7×10^{-4} в С5, D5 к Ю и ЮВ); (б) – амплитуда СД на 01.05.2019 г. (сплошная изолиния на 0.5×10^{-4} , максимумы: 1.3×10^{-4} в А1 к З, 1.0×10^{-4} в С3, D5 к Ю и ЮВ).

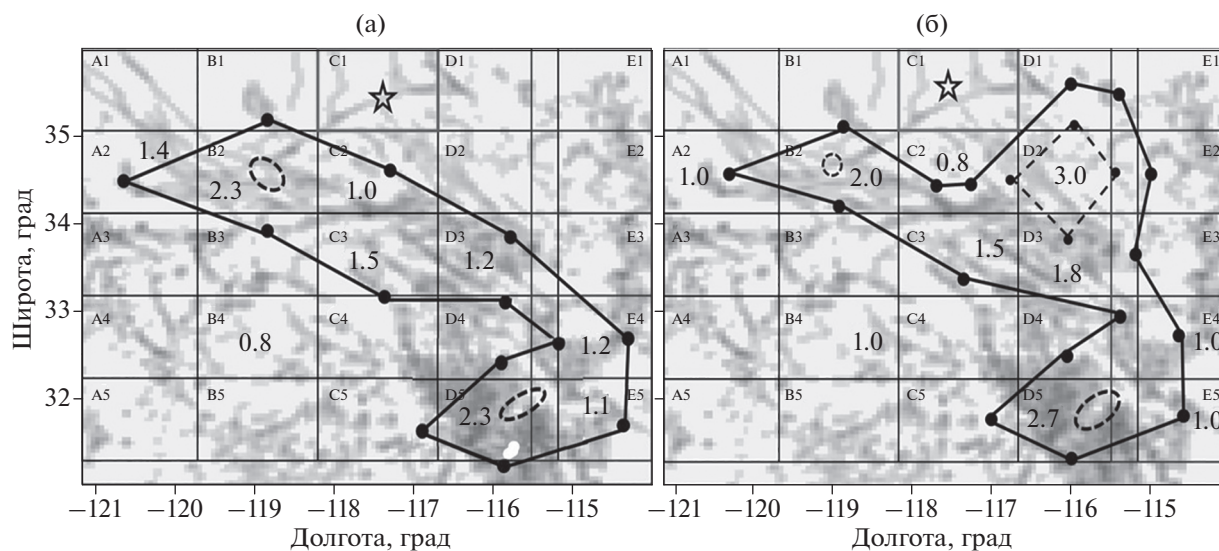


Рис. 8. Контуры аномалий сдвиговой деформации (СД) для последнего затишья перед событием: (а) – затишье на 15.06.2019 г. (сплошная изолиния на 1×10^{-4} , максимумы 2.3×10^{-4} в В2 на ЮЗ и в D5 на ЮВ); (б) – затишье на 01.07.2019 г. (сплошная изолиния на 1×10^{-4} , пунктир на 2×10^{-4} , максимумы 3×10^{-4} в D2 на ЮВ и 2×10^{-4} в В2 на ЮЗ, 2.7×10^{-4} в D5 на ЮВ).

во втором слое земной коры на глубине 3–7 км в окружающем ЭЗ пространстве (рис. 9б). Максимум амплитуды смещения (порядка 0.15 м) в модели находится на расстоянии $R \sim 100$ км к юго-востоку от ЭЗ. Для сравнения в ЭЗ нанесены распределения поверхностных смещений в окрестности очага по данным спутникового мониторинга Sentinel-2 (рис. 9а, 9б) за период с 28.06.2019 по 08.07.2019 гг. [Chen et al., 2020]. Максимальный сдвиг в очаге оценивается в 1.6 м.

Направление сдвига в очаге по северо-восточному борту разрыва отмечается в направлении с северо-запада на юго-восток (область с красноватыми оттенками), а по юго-восточному борту – с юго-востока на северо-запад (область с синеватыми оттенками), что соответствует результатам геомеханического моделирования в непосредственной близости от юго-восточной оконечности очага в окружающем пространстве во время последнего перед событием затишья.

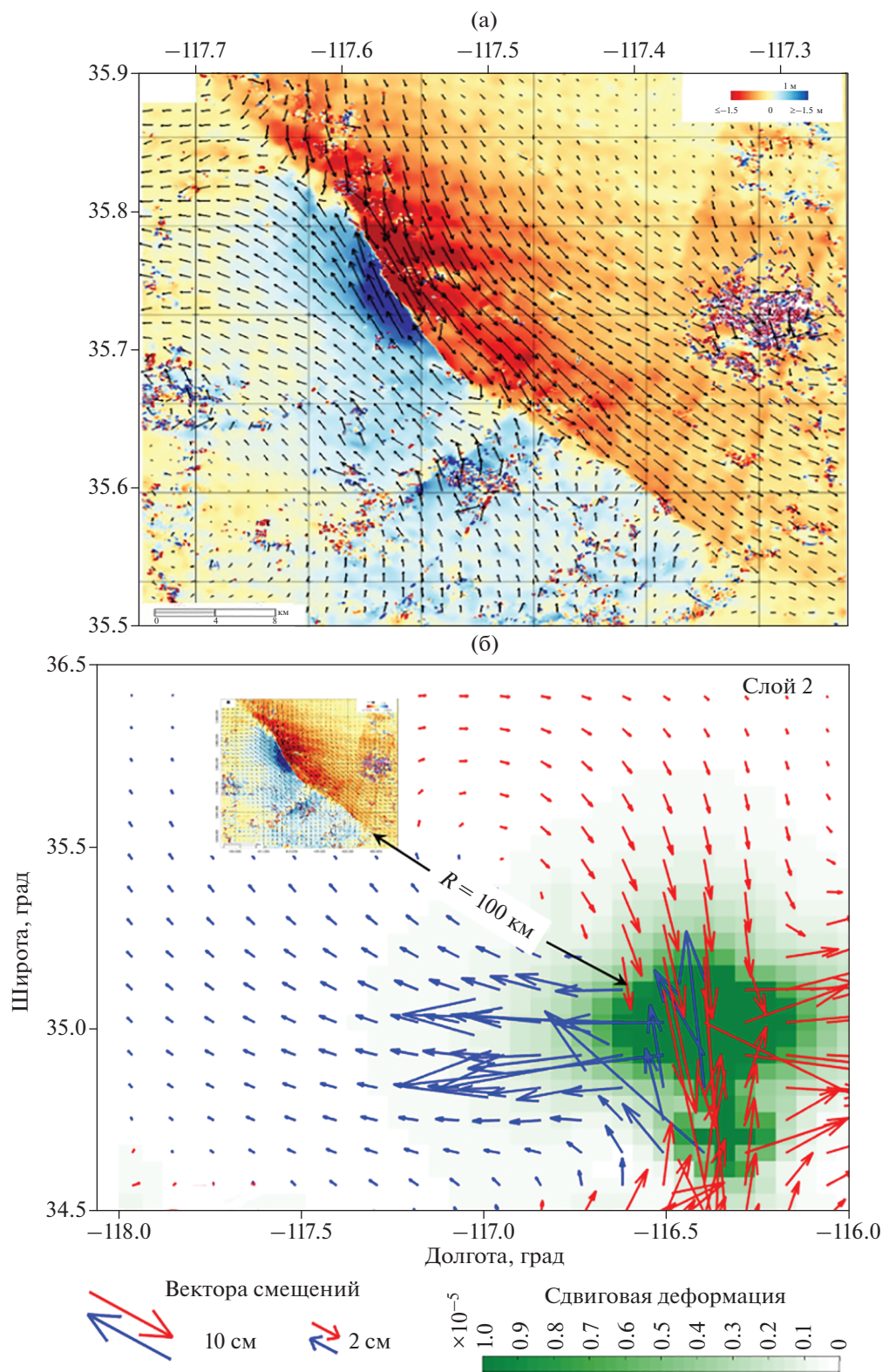


Рис. 9. (а) – Карта поверхностных смещений в районе землетрясений Риджкрест из работы [Chen et al., 2020] по данным спутникового мониторинга Sentinel-2, построенная за период с 28.06.2019 по 08.07.2019 гг.; (б) – сопоставление смещений на глубине 3–7 км, рассчитанных в модели за 5 дней до события, и смещений в очаге по данным космических снимков, полученных аппаратом Sentinel-2.

Таким образом, в период последнего затишья, за 5 дней до события отмечается некоторая согласованность как в направлении смещений, так и в распределении амплитуд СД между окружающим ЭЗ пространством на глубинах второго слоя земной коры и будущим очагом землетрясения на поверхности Земли.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Часть 1

Проанализирован ряд последовательных экскурсов напряженно-деформированного состояния, начиная с мая 2016 г. за время около 3-х лет до события Риджкrest 2019 г. Показано, что в каждом экскурсе в период затишья в окружении ЭЗ возникают максимумы СД, пространственное распределение которых меняется в процессе подготовки события.

В начале (экскурсы 1, 2, 3) активизация СД как в ЭЗ, так и вне ее носит локальный характер. В период затишья области максимальных СД концентрируются в основном в непосредственной близости к югу и юго-западу от ЭЗ.

Начиная с 01.08.2018 г. (экскурс 4), за год до события, в период затишья область активизации СД расширяется вокруг ЭЗ в форме отдельных максимумов с запада, востока и юго-востока, и, помимо возрастания амплитуды СД в ЭЗ, появляется дополнительный максимум на юге.

Максимального расширения области СД достигают в последнем перед событием экскурсе 5 на 15.06.2019 г., охватывая практически все протяжение разлома Сан-Андреас в модели, что соответствует размерам зоны подготовки землетрясения с $M = 7$.

Во время последнего затишья на 01.07.2019 г., за 5 дней до события аномалия СД начинает снова концентрироваться в непосредственной близости от ЭЗ, охватывая ее со всех сторон. При этом, в отличие от предыдущих распределений, максимум амплитуды находится в непосредственной близости с юго-востока от ЭЗ. Таким образом, в процессе последовательного чередования экскурсов происходит постепенное расширение аномальных областей СД вне ЭЗ в периоды затишья и во время всплесков СД после затишья.

Землетрясение Риджкrest 06.07.2019 г. происходит после последнего 6-го затишья, когда зона аномальных СД окружает ЭЗ со всех сторон, причем максимальное воздействие возникает в непосредственной близости с юго-восточной стороны.

Следует отметить, что несмотря на то, что землетрясение Риджкrest произошло в окрестности разлома Гарлок, на всем протяжении процесса подготовки разлом Сан-Андреас играет значительную роль. Как видно из рис. 7б и рис. 8, при

приближении к моменту события вся зона разлома Сан-Андреас испытывает аномальные СД.

Таким образом, можно говорить о том, что по расчетам динамики НДС в геомеханической модели Южной Калифорнии обнаружены ранние проявления краткосрочных предвестников, состоящие в последовательном чередовании периодов затишья в СД при максимальном удалении пород ЭЗ от предела прочности по параметру D (упрочнение) и всплесков СД с приближением пород к пределу прочности по параметру D .

Нужно отметить, что на основании этих результатов могут быть выполнены расчеты усилий при воздействии СД, окружающих ЭЗ в периоды затишья, но это выходит за рамки настоящей работы.

Можно предположить, что неоднократные периоды затишья предшествовали медленным землетрясениям (*slow earthquake*). Такие землетрясения, которые продолжаются порядка недель или месяцев без выделения сейсмической энергии, были ранее зарегистрированы американскими геофизиками на разломе Сан-Андреас [Linde et al., 1996]. Бесшумные землетрясения могут вызвать множество землетрясений небольшой магнитуды, что, в свою очередь, готовит почву для более катастрофического события.

Последовательное появление максимумов СД в окружающем ЭЗ пространстве во время затишья, а затем аномальные всплески амплитуды СД в самой ЭЗ при отсутствии таковых в окружающем пространстве соответствует ситуации так называемых “качелей”. Возникновение аномалий СД происходит попеременно в ЭЗ и окружающем пространстве (ОП) на расстояниях порядка 100–400 км с периодами $T \sim 1–8$ мес. в соответствии с временами экскурсов. При этом амплитуда в каждом цикле раскачивания меняется более чем на порядок: от 10^{-5} до 5×10^{-4} .

В период возникновения экскурсов, за 3 года до события идет как бы “раскачивание” всей области подготовки землетрясения, что может быть продемонстрировано на следующем рисунке (рис. 10).

Вообще говоря, если следовать такой модели – раскачивания, то при краткосрочном прогнозе можно полагать, что начался процесс, связанный с реализацией самого события. На каком же именно цикле раскачивания произойдет землетрясение, в рамках данного анализа остается неясным, пока не будут найдены надежные отличительные особенности последовательности экскурсов. В данной ситуации приобретает большое значение изучение пространственно-временного распределения векторов смещений, представленного на рис. 9, которое как новый параметр сможет способствовать выявлению различий на разных этапах “раскачивания”.

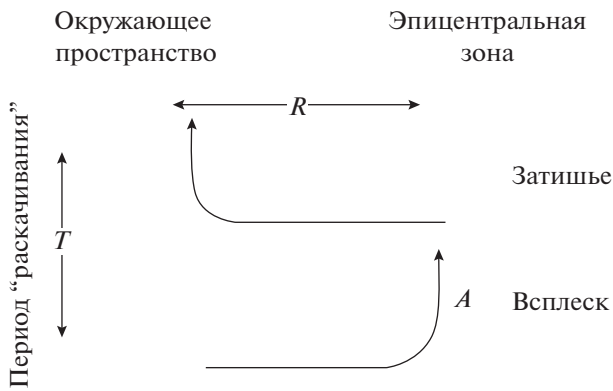


Рис. 10. Схематическая модель “раскачивания” области подготовки землетрясения Риджкrest за 3 года до события. Расстояние R составляет порядка 100–400 км, период раскачивания T — от 1 до 8 мес., амплитуда вариаций деформации — от 1×10^{-5} до 5×10^{-4} , продолжительность циклического раскачивания — около 3 лет.

Часть 2

Образование зоны затишья перед землетрясением можно объяснить, отталкиваясь от известных моделей подготовки землетрясений — дилатантно-диффузионной модели (ДД-модель) [Nur, 1972; Whitcomb et al., 1973; Scholz et al., 1973; Rice, 1975] и модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель) [Мячкин и др., 1974; 1975].

Неупругое деформирование земной коры при приближении к пределу прочности сопровождается дилатансией — увеличением объема трещиноватой породы [Николаевский, 1971]. В результате раскрытия трещин поровое давление в породе падает и возрастают эффективные нормальные напряжения, что приводит к дилатантному упрочнению массива в очаге (зоны затишья в ЭЗ-с1) по отношению к продолжающемуся деформирова-

нию (зоны вокруг окна С1 в период затишья). Далее, при восстановлении порового давления эффективные напряжения уменьшаются и процесс растрескивания возобновляется, что ведет к разрушению материала, выражающемуся в реализации нисходящей ветви диаграммы деформирования. Выполненный в работе [Rice, 1975] количественный анализ показал, что при этом дилатантное упрочнение становится неустойчивым в области отрицательных значений пластического модуля.

После достижения пикового напряжения в характере распределения трещин наступают заметные изменения. Наблюдается появление преимущественной ориентации дефектов в результате частичного закрытия одних из них и ускоренного роста других, что ведет к разрушению материала, выражающемуся в реализации нисходящей ветви диаграммы деформирования, и переходу материала в состояние реологической неустойчивости [Гарагаш, Николаевский, 1989]. При этом формируются узкие трещиноподобные макроскопические нарушения, связывающие большое число микродефектов. Такие нарушения, называемые полосами сдвига, представляют собой зоны локализации пластической деформации, вдоль которых и происходит окончательное разрушение материала, приводящее к выделению сейсмической энергии. На рис. 11 показаны полосы сдвига, сформированные в образцах песчаника в условиях трехосного сжатия [Desrues, Viggiani, 2004]. Характерно, что две параллельные полосы сдвига сформировались при переходе на падающую ветвь диаграммы деформирования в точке 5.

Таким образом, особенности деформирования земной коры в готовящемся очаге землетрясения укладываются в представления теорий подготовки

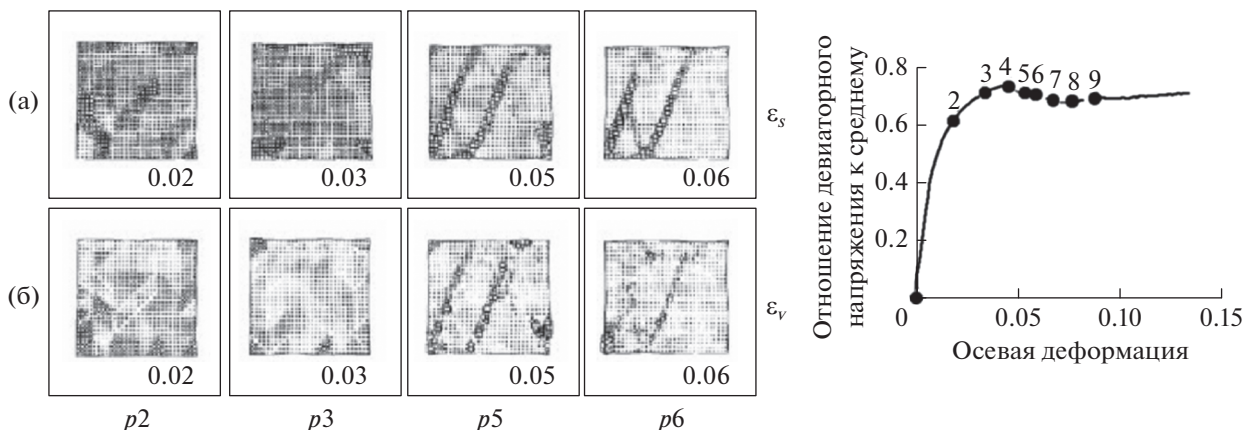


Рис. 11. Картина распределений деформаций сдвига (а) и объемной деформации (б), соответствующих точкам 2, 3, 5 и 6 на кривой деформирования.

землетрясений и находят подтверждение в экспериментах с образцами горных пород.

Поскольку в данной работе анализ проводится в основном по распределениям сдвиговых деформаций (СД), абсолютные значения которых могут отличаться от реально измеряемых, ниже приводится некоторая калибровка.

Распределение расчетных деформаций сдвига за месяц в верхнем слое земной коры Южной Калифорнии несколько превышает типичный средний уровень деформаций, фиксируемых экспериментально [Габсатаров, 2012] Это связано с тем, что задаваемые в модели значения механических параметров поврежденности и нагрузок являются ориентировочными и, конечно, не могут дать полного совпадения расчетных и наблюдаемых параметров. Поэтому если оперировать абсолютными величинами, то расчетные значения нуждаются в калибровке, и для совпадения среднего уровня сдвиговых деформаций с экспериментальными значениями нужно расчетные значения принимать с коэффициентом $k = 0.3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При детальном анализе НДС локальных участков земной коры на геомеханической модели Южной Калифорнии перед землетрясением Риджкрест 06.07.2019 г. с $M = 7.1$ обнаружены ранние проявления краткосрочных предвестников за три года до события.

Непосредственно в эпицентральной зоне выявлено последовательное чередование промежутков времени порядка нескольких месяцев с отсутствием сдвиговых деформаций (СД) и максимальным удалением пород от предела прочности по параметру D и последующих всплесков активности в СД с резким приближением пород к пределу прочности.

Такие временные промежутки названы “Экскурсами”, и перед данным событием их наблюдается 5. Наибольший по амплитуде – экскурс 1 (май–август 2016 г.). Экскурсы не противоречат существующим теориям подготовки землетрясений и возможно сопровождаются “медленными землетрясениями”, имеющими место в Калифорнии. Детальный анализ пространственного распределения СД во время экскурсов в период затишья показал, что вокруг ЭЗ на различных расстояниях и с разных сторон происходит активизация СД, размеры областей которой последовательно увеличиваются при приближении к моменту события.

Почередное появление сдвиговых деформаций в эпицентральной зоне и окружающем пространстве соответствует ситуации “раскачивания” области подготовки землетрясения Риджкрест за 3 года до события. Во время последнего затишья

за 5 дней до события область максимальных СД концентрируется в непосредственной близости от ЭЗ с существенно отличающейся конфигурацией. Имеется корреляция направлений векторов смещений на глубине второго слоя земной коры и смещений в очаге на поверхности Земли, определенных по космическим снимкам.

Усилия при воздействиях СД окружающего пространства на ЭЗ могут быть рассчитаны в модели на основе полученных результатов, однако это выходит за рамки настоящей работы.

Полученные результаты находятся в согласии с теоретическими моделями процессов подготовки землетрясений. Наличие обнаруженных экскурсов может осложнить возможности реального краткосрочного прогноза количеством “ложных тревог” без нахождения новых особенностей пространственно-временных распределений СД и D перед самим событием. Более детальные расчеты с приращениями параметров НДС на меньших промежутках времени с привлечением новых параметров, возможно, помогут решить данную проблему.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, выполняемого в НИИ “АЭРОКОСМОС” (тема № АААА-А19-119081390037-2), а также ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 5. С. 598–601. <https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- 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 // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- 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 // Докл. РАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Локальная аномалия напряженного состояния земной коры перед сильным землетрясением ($M = 7.1$) 05.07.2019 г. в районе г. Риджкрест (Южная Калифорния) // Докл. РАН. 2020а. Т. 490. № 1. С. 17–21.
- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Некоторые причины трудностей краткосрочного прогноза землетрясений и возможные пути решения // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020б. Т. 495. № 2. С. 40–50.
- 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.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Докл. РАН. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеamentов // Исслед. Земли из космоса. 2005б. № 3. С. 37–52.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.

Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.

Габсатаров Ю.В. Анализ деформационных процессов в литосфере по геодезическим наблюдениям на примере разлома Сан-Андреас // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 275–287.

Гарагаш И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализация пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12. Вып. 1. С. 131–183.

Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герасимович Е.А., Матвеев И.В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука. 1985. 114 с.

Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 3. С. 3–11.

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процессов подготовки землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1974. № 10. С. 107–122.

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений. Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6–29.

Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучих сред // Прикладная математика и механика. 1971. Т. 35. № 6. С. 1070–1082.

Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // Физика Земли. 2006. № 9. С. 5–17.

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B. The dynamics of the stress state in Southern California based on the geomechanical model and current seismicity: Short term Earthquake prediction // Russ. J. Earth Sci. 2017. V. 17. ES105.

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. V. 8. P. 391.

<https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>

Cenni N., Viti M., Mantovani E. Space geodetic data (GPS) and earthquake forecasting: examples from the Italian geodetic network // Boll. Geofis. Teor. Appl. 2015. V. 56. № 2. P. 129–150.

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. Commun. 2020.

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13750-w>

Desrués J., Viggiani G. Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry // Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2004. V. 28. P. 279–321.

Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review // Geophys. J. Int. 1997. V. 131. P. 425–450.

Linde A.T., Gladwin M.T., M.S. Jonston, Gwyther R.L., Bingham R.G. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault // Nature. 1996. V. 283. P. 65–68.

Nur A. Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of travel times // Bull. Seism. Soc. Am. 1972. V. 62. P. 1217–1222.

Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics. 2007. V. 431. P. 211–220.

Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., Panza G.F. The contribution of pattern recognition of seismic and morphostructural data to seismic hazard assessment // Boll. Geofis. Teor. Appl. 2015. V. 56. № 2. P. 295–328.

Rice J.R. On the stability of dilatant hardening for saturated risk masses // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 11. P. 1531–1536.

Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis // Science. 1973. V. 181. P. 803–810.

Whitcomb J.H., Garmany J.D., Anderson D.L. Earthquake prediction variation of seismic velocities before the San-Fernando earthquake // Science. 1973. V. 180. P. 623–635.

Early Manifestations of Short-Term Precursors in the Dynamics of the Stress-Strain State of Southern California

V. G. Bondur^{a,*}, M. B. Gokhberg^{a,b}, I. A. Garagash^{a,b}, and D. A. Alekseev^{a,b,c,d}

^aAEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, 105064 Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

^cMoscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, 141701 Russia

^dShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218 Russia

*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

The stress-strain state before the $M = 7.1$ Ridgecrest earthquake in Southern California is analyzed based on the spatiotemporal distribution of shear strains calculated in the geomechanical model on the local crustal segments with a size of $\sim 100 \times 100$ km at a depth of 3–7 km. Starting from three years before the event up to the time of its occurrence, a successive series of the time intervals when shear deformations are completely absent and rocks are maximally far from the ultimate strength—the so-called quiescence zones—are established in the epicentral zone of the earthquake. The spatial distribution of shear strains in the vicinity of the epicentral zone is analyzed during the quiescence intervals and during the subsequent bursts of maximum amplitude in the epicentral zone itself. The time intervals of the bursts are called the excursions. The successive emergence of the maxima in the shear strain amplitudes in the epicentral zone and in the surrounding medium during the excursions corresponds to the situation of a swing experienced by the entire region of the preparation of the future earthquake up to the occurrence of the event. The correspondence of the revealed pattern with the existing theoretical models of earthquake preparation is discussed.

Keywords: geomechanical model, shear strain, earthquake, excursions, stress-strain state, Southern California