

МИГРАЦИЯ АНОМАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ НА ФЛАНГАХ ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ОЧАГА – МОДЕЛЬ “КАЧЕЛИ”

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

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

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 23.01.2023 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

Полученные в рамках геомеханического моделирования результаты по динамике напряженно деформированного состояния перед землетрясением $M = 7.1$ Риджкрест 2019 г. (Южная Калифорния) указывают на попеременное развитие максимальных смещений на оконечностях разрыва, что имитирует процесс “раскачивания” эпицентральной зоны данного землетрясения. На основе данных результатов с использованием имеющихся теоретических представлений о блоковой структуре земной коры с соответствующими межблоковыми связями, предложена геомеханическая модель “Качели”, основанная на явлении прерывистого скольжения (*stick-slip*) трех связанных между собой блоков. Параметры этой модели связаны с реологическими свойствами земной коры в области разрушения перемычки, определяющей размеры очага сейсмического события.

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

DOI: 10.31857/S0002333723040026, **EDN:** TKZYUQ

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы краткосрочного прогноза сильных землетрясений активно разрабатываются с использованием различных подходов, включая технологии дистанционного зондирования [Акопян и др., 2017; Бондур и др., 2007]. Важным звеном в понимании динамики напряженно-деформированного состояния среды перед катастрофическими событиями является разработка моделей разрушения земной коры, направленная на изучение таких особенностей развития данного процесса, которые могли бы рассматриваться как краткосрочные предвестники.

Согласно недавнему обзору [Kato, Ben-Zion, 2021] для объяснения процесса подготовки крупных землетрясений используются три основные модели: каскадно-восходящая (*cascade-up*), предсейсмического скольжения (*pre-slip*) и прогрессирующей локализации (*progressive localization*). Каскадно-восходящая модель предполагает, что подготовка землетрясения связана с прогрессирующим разупрочнением горных пород, вызванным слабой сейсмичностью на протяжении длительного интервала времени в пределах системы ранее существовавших разломов, подверженных фоновым тектоническим напряжениям [Yoon et al.,

2019]. В рамках модели предсейсмического скольжения основное внимание уделяется медленным асейсмическим движениям, происходящим в конкретном разломе перед крупным сейсмическим событием [Dieterich, 1992; Кочарян, 2014], а концепция прогрессирующей локализации описывает динамику распределенных напряжений и деформаций, развивающихся таким образом, что перед сейсмическим вспарыванием возникает аномалия деформации сдвига в зоне, не связанной с ранее существовавшими разломами [Rice, 2017; Ben-Zion, Zaliapin, 2020].

Механическая устойчивость сейсмически активных зон с уже имеющимися разрывными нарушениями рассматривается, например, в моделях лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) и диффузионно-дилатантной концепции (ДД) [Мячкин и др., 1975]. При этом, процесс сводится к разрушению так называемой перемычки, ограниченной с двух сторон начавшимся образованием трещин, что находит отражение в лабораторных экспериментах [Соболев, Пономарев, 2003].

В работе [Гарагаш, 2000] показано, что разрушение перемычки перед Кроноцким землетрясением на Камчатке связано с появлением ано-

малии гантелевидной формы в касательных напряжениях. Эффективность применения геомеханического моделирования на примере Южной Калифорнии показана в работах [Bondur et al., 2020; Бондур и др., 2010; 2016; 2021], где выявлены краткосрочные предвестники в динамике НДС сильных землетрясений 2010 и 2019 гг. с $M = 7.1$.

Другое направление в изучении природы сейсмичности связано с конструированием детерминированных механических моделей, используемых для описания процессов в разломно-блоковых структурах земной коры [Burridge, Knopoff, 1967]. Эти модели представляют собой набор отдельных элементов (блоков), лежащих на движущейся плите и соединенных между собой пружинными жесткими связями. Преодоление сил трения на контакте с плитой способствует проскальзыванию отдельных блоков. Такое прерывистое скольжение (*stick-slip*) и порождает сейсмические события. Д. Туркотт [Turcotte, 1994] провел обзор большого числа детерминированных механических моделей, эволюция которых во времени использовалась широким кругом исследователей для описания такого в целом хаотического природного процесса, как сейсмичность [Huang, Turcotte, 1990; Narkounskaia, Turcotte, 1992; Brown et al., 1991; Carlson et al., 1993].

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основой создания модели “Качели” являются результаты, полученные по динамике напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры Южной Калифорнии перед землетрясением Риджкrest 6.07.2019 г. с $M = 7.1$ и координатами 35.766° с.ш. и 117.605° з.д.

Анализ проводился в рамках пятислойной геомеханической модели, учитывающей разломную тектонику, реологические свойства слоев земной коры, рельеф и внешние тектонические воздействия, что подробно описано в работах [Bondur et al., 2020; Бондур и др., 2010; 2016; 2021]. В плане область моделирования имеет размер 645×560 км ($31\text{--}36^\circ$ с.ш. и $114\text{--}121.2^\circ$ з.д.) и дискретизируется прямоугольной сеткой с элементами (ячейками) 5×5 км. Модель охватывает 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 Кулона–Мора (модуль объемного сжатия K , модуль сдвига G , сцепление c и угол внутреннего трения ϕ). Разломно-блоковая тектоника региона задается с использованием данных линейamentного анализа [Bondur et al., 2010]. Распределения некоторых параметров показаны на рис. 1.

На первом этапе геомеханического моделирования выполнялся расчет начального напряженного состояния модели, отражающего ее начальную поврежденность, связанную с разломно-блоковой тектоникой, учитывающего собственный вес и действие региональных тектонических сил. Вычисления проводились в квазистатическом приближении с использованием программного пакета FLAC3D [Itasca..., 2006].

Последующее моделирование предполагает учет текущей сейсмической активности и реализуется в виде итерационной процедуры пересчета текущего состояния (НДС) модели, осуществляемой путем последовательной коррекции значений геомеханических свойств (модулей объемного сжатия, сдвига, сцепления и угла внутреннего трения) тех элементов (ячеек) модели, которые оказались затронуты сейсмическими событиями с магнитудами $M > 1$ (по данным каталога USGS ComCat, <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>), в трехмесячный временной интервал, предшествующий моменту расчета НДС. Корректировка осуществляется на основе оценок выделившейся энергии землетрясений и максимального касательного напряжения. Скорректированная модель используется для расчета нового НДС. Затем описанный цикл повторяется для нового трехмесячного интервала, сдвинутого на 0.5 мес. относительно предыдущего (рис. 2).

Таким образом, “работа” модели в режиме мониторинга сводится к последовательному расчету НДС с полумесячным интервалом по времени. Полученные массивы параметров НДС используются для расчета и визуализации ключевых кинематических характеристик – приращения вектора смещения $u = \{u_x, u_y, u_z\}$, рассчитываемого во всех узлах сетки, а также интенсивности деформации сдвига (сдвиговой деформации – СД) γ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{6}[(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2] + \epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2},$$

где ϵ_{ij} – компоненты тензора деформации.

Распределения горизонтальной составляющей смещения для того или иного слоя модели представляются в виде стрелок, длины которых пропорциональны амплитуде смещения в соответ-

ствующих узлах. Интенсивность деформации изображается в виде цветовых карт.

Динамика НДС исследовалась при введении в модель текущей сейсмичности, когда каждое землетрясение, начиная с $M > 1$ по каталогу USGS

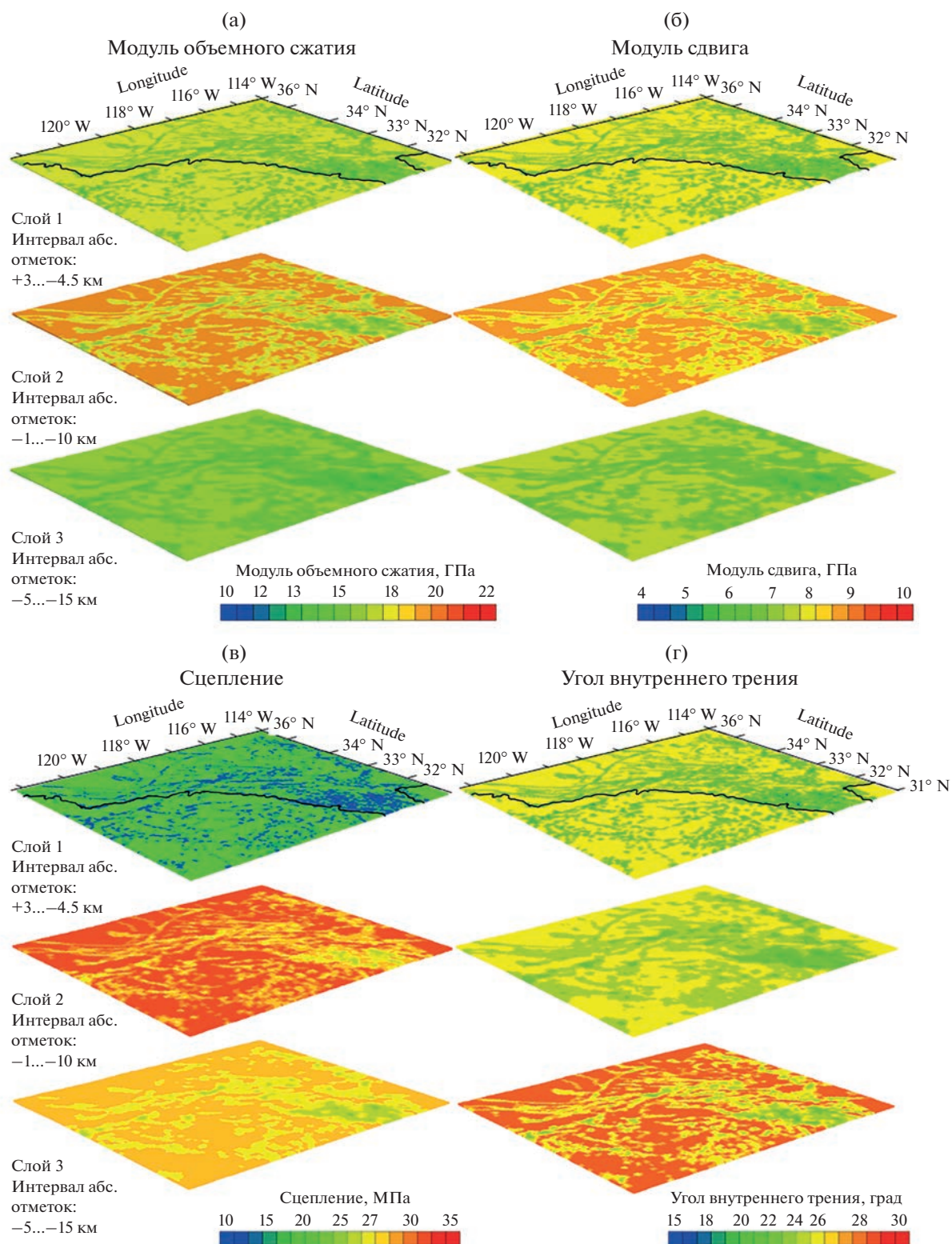


Рис. 1. Карты начальных распределений геомеханических параметров для 3 верхних слоев модели: модуль объемного сжатия (а), модуль сдвига (б), сцепление (в) и угол трения (г). Неоднородности отражают разломную тектонику региона.

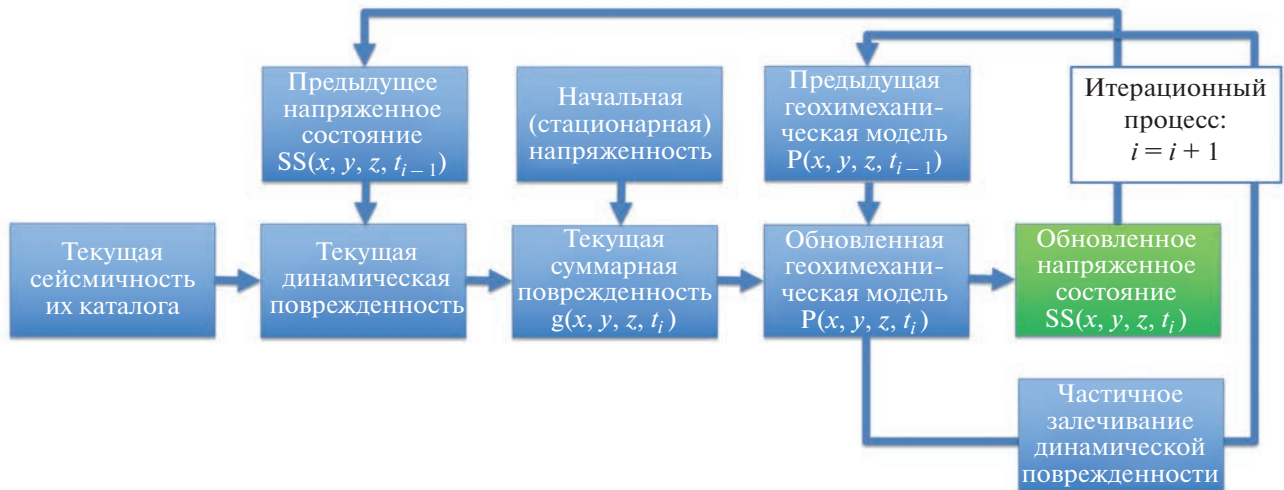


Рис. 2. Схема итерационной процедуры вычисления напряженно-деформированного состояния модели, обновляемого при сдвиге интервала учета текущей сейсмичности.

рассматривалось как новый дефект земной коры соответствующих размеров, приводящий к перераспределению деформаций [Бондур и др., 2016].

Используемые для построения модели результаты относятся к пространственно-временным распределениям приращений деформации сдвига (СД) и векторов смещения на глубине 3–10 км второго слоя верхней земной коры, где локализуется основная текущая сейсмичность Южной Калифорнии.

На рис. 3. представлено распределение максимальных значений приращений СД и смещений с двух сторон от будущего разрыва землетрясения Риджквест 06.07.2019 г. за 1.5 мес. и 5 дней, соответственно. Размеры областей составляют порядка 20 км при детальности по размерам расчетных ячеек в модели 5×5 км, а величины приращения смещений за 0.5 мес. достигают порядка десятков сантиметров.

Полученное распределение в окрестности реального очага находится в согласии с теоретической моделью развития трещины из работы [Мячкин и др., 1975] (рис. 4).

В работе [Бондур и др., 2022] приводятся результаты по динамике НДС в эпицентральной зоне (ЭЗ) на 2018–2019 гг. примерно за 1.5 года до землетрясения, когда началось интенсивное формирование очага (рис. 3). Как видно, аномальное развитие приращения смещений в СД с двух сторон от формирующегося очага принимает гантелевидную форму готовой к разрушению перемычки.

Вместе с тем, в теоретических и лабораторных исследованиях по развитию трещин не обсуждается временная последовательность чередования

разрушений с разных сторон от готовящегося разрыва.

В соответствии с рис. 5 и рис. 6 приведено последовательное пространственное распределение характерных моментов максимальных смещений, начиная с марта 2018 г., когда, как показано в работах [Бондур и др., 2021; 2022], проявляется интенсивное формирование очага. Поочередное появление максимальных смещений на разных оконечностях будущего разрыва имитирует процесс раскачивания эпицентральной зоны (ЭЗ) вплоть до момента события.

Детальное распределение всех величин приращения смещений за данный промежуток времени приведено на рис. 7 [Бондур и др., 2022].

Отрицательные величины, показанные красным цветом, соответствуют местоположению аномальных смещений с ЮВ стороны продолжения простираения очага, а положительные (синего цвета) с СЗ стороны в соответствии с рис. 5.

Таким образом, приведенные результаты указывают на наличие процесса раскачивания области, готовящейся к разрушению перемычки. При этом, период раскачивания таких “качелей” составляет порядка одного–нескольких месяцев, протяженность порядка 100 км, размеры аномальных областей – в пределах 20 км. Величины приращения смещений, моделируемых на глубинах 3–10 км второго слоя верхней земной коры в геомеханической модели, достигают десятков см.

МОДЕЛЬ “КАЧЕЛИ”

Согласно современным представлениям, земная кора представляет собой иерархическую дискретную среду [Садовский, Писаренко, 1991]. Та-

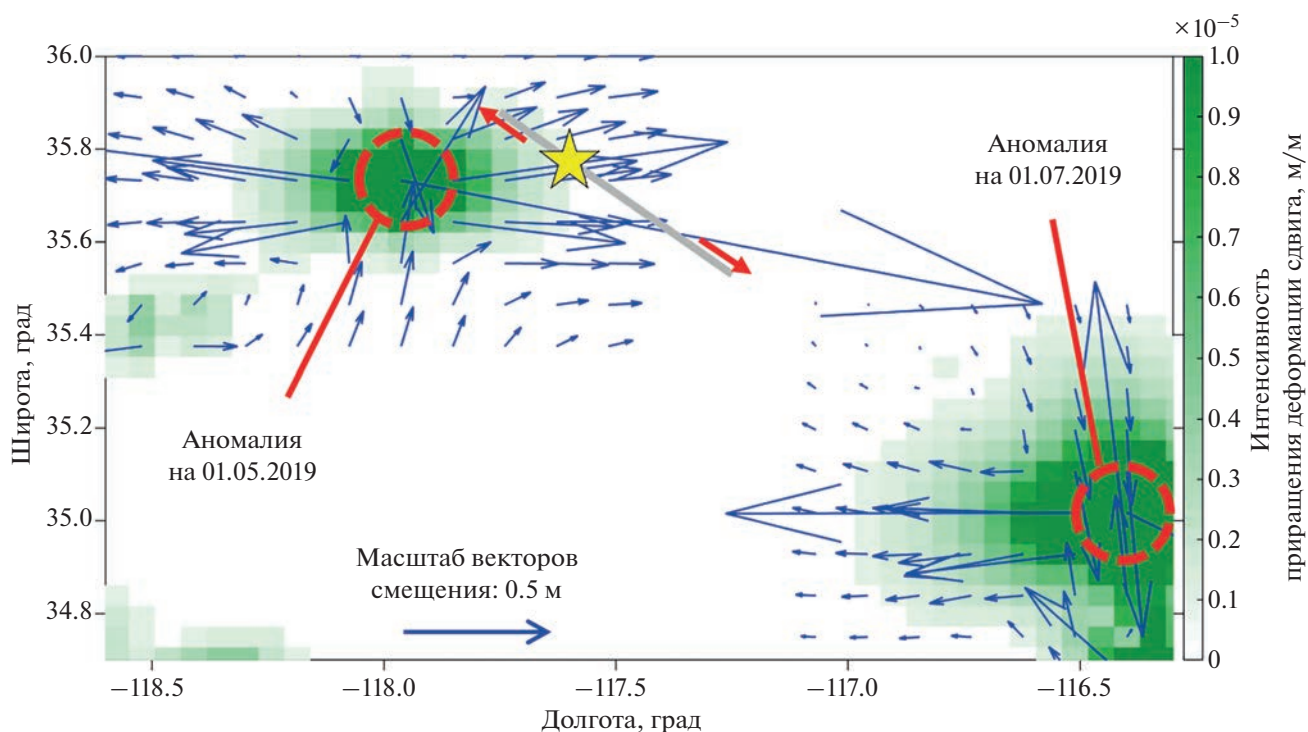


Рис. 3. Совмещенные аномалии напряженно-деформированного состояния, выделяемые на юго-восточном и северо-западном продолжениях будущего разлома Риджкрест по состоянию на 01.05.2019 г. и 01.07.2019 г. Цветом показаны значения интенсивности приращения деформации сдвига (шкала дана в безразмерных единицах); синими стрелками — векторы смещения. Серая линия соответствует осредненному положению главного разлома землетрясения Риджкрест, желтая звездочка — эпицентру главного толчка, а красные стрелки показывают смещения блоков среды по разлому.

кое строение неоднородной среды определяет развитие сейсмотектонического процесса. Подтверждением этого вывода является модель разлома [Burridge, Knopoff, 1967], объясняющая эволюцию сейсмического процесса (рис. 8).

Модель представляет собой набор отдельных элементов (блоков) с массой m , лежащих на неподвижной горизонтальной плите и соединенных между собой пружинными жесткими связями k_c . С подвижной горизонтальной плитой, движущейся со скоростью V , элементы соединены пластинчатыми элементами с жесткостью k_l . Преодоление силы трения F_i между нижней плитой и блоками приводит время от времени к проскальзыванию отдельных блоков. Проскальзывать может как отдельный блок, так и несколько блоков. Такое прерывистое скольжение (*stick-slip*) и возникающие при этом фрикционные автоколебания связывают с возникновением землетрясений [Короновский и др., 2015]. Примером эффективности такого подхода может служить клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах [Керчман, Лобковский, 1988; Лобковский и др., 2017].

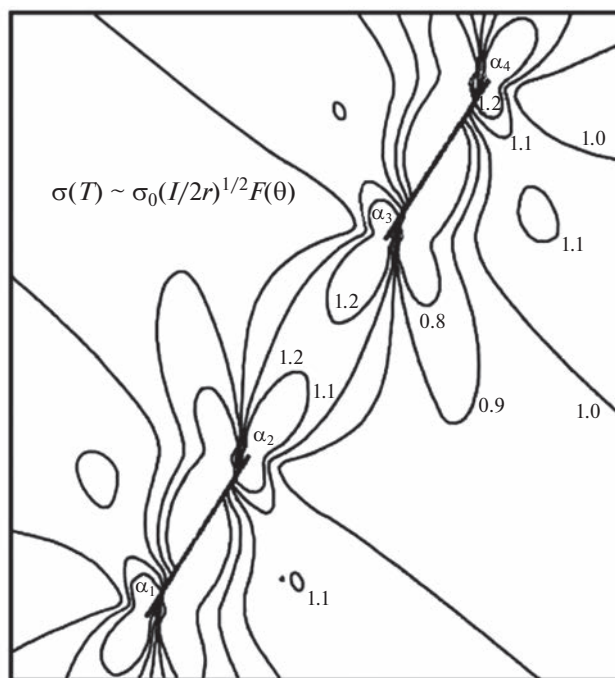


Рис. 4. Структура поля максимальных касательных напряжений между двумя трещинами по данным работы [Мячкин и др., 1975].

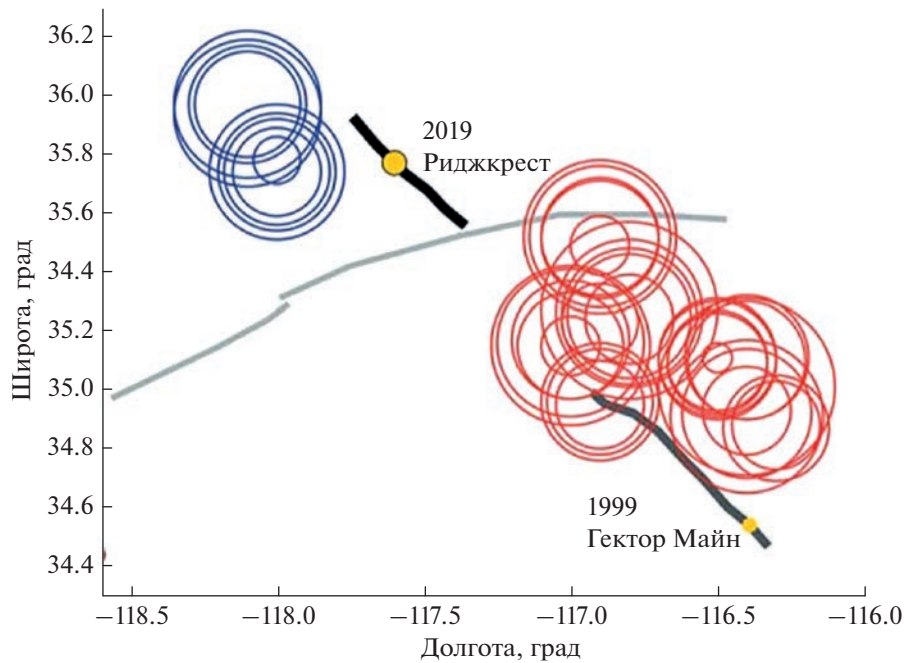


Рис. 5. Расположение и интенсивность аномалий деформации сдвига, наблюдаемых на юго-восточном (красные кружки) и северо-западном (синие кружки) продолжениях разлома Риджкрест в период с марта 2018 г. по июнь 2019 г. Размеры кружков соответствуют пространственным размерам аномальных областей, оконтуренных по пороговому значению СД, составляющему 10^{-5} . Толстыми черной и серой линиями показаны разломы землетрясения Риджкрест 2019 г. и Гектор Майн 1999 г., соответственно; желтыми кружками – эпицентры их главных толчков. Светло-серой линией обозначен разлом Гарлок.

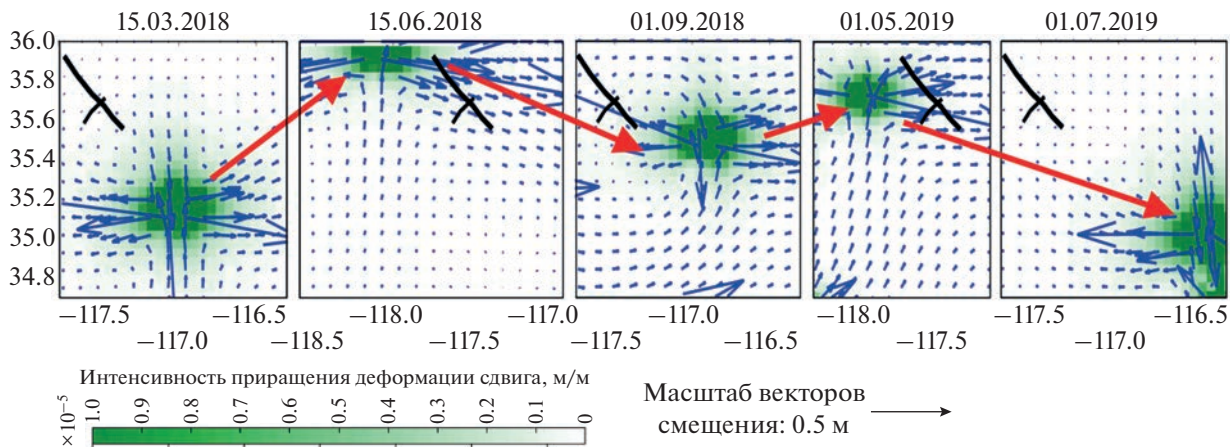


Рис. 6. Циклы миграции (“раскачивания”) области максимальных сдвиговых деформаций в эпицентральной зоне. Цветом показана интенсивность деформации сдвига, синими стрелками – векторы смещения. Черными линиями показаны разломы, соответствующие главному толчку землетрясения Риджкрест 06.07.2019 г. (длинная) и его форшоку 04.07.2019 г. (короткая).

Оставаясь в изложенной парадигме, рассмотрим следующую модель движения блоков, объясняющую раскачивание перемычки перед разрушением. Рассмотрим движение трех блоков, размещенных на движущейся со скоростью V плите (рис. 9а).

Средний блок представляет собой перемычку. Блоки скреплены между собой упругими связями с коэффициентами k_2 , k_3 и вязкими элементами с коэффициентом вязкости μ . Крайние блоки с помощью упругих элементов с жесткостью k_1 , k_4 взаимодействуют с неподвижными преградами.

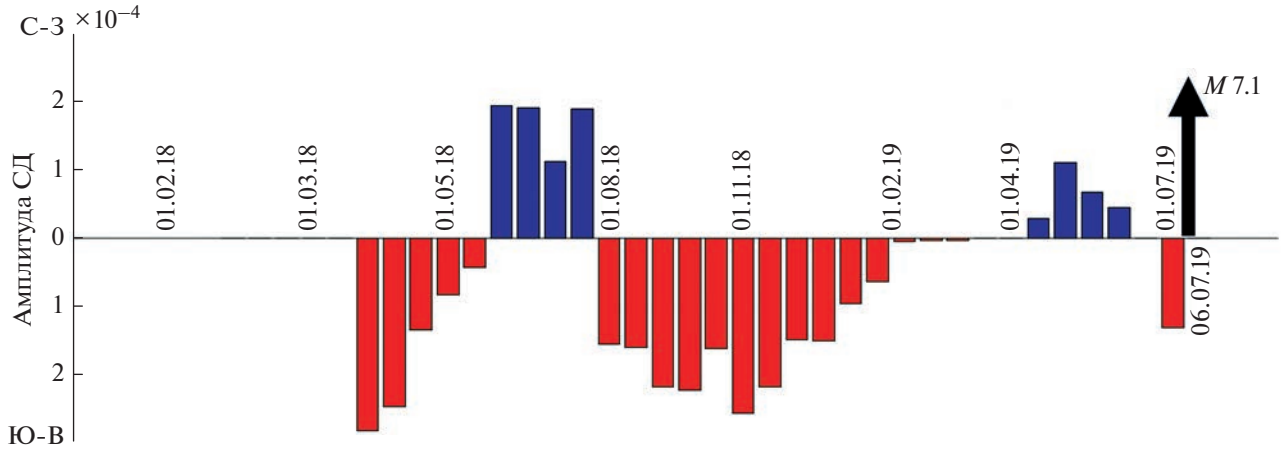


Рис. 7. Вариации интенсивности аномалий деформации сдвига, наблюдаемых на юго-восточном (красные столбики) и северо-западном (синие столбики) продолжениях разлома Риджкросс в период с марта 2018 по июнь 2019 гг.

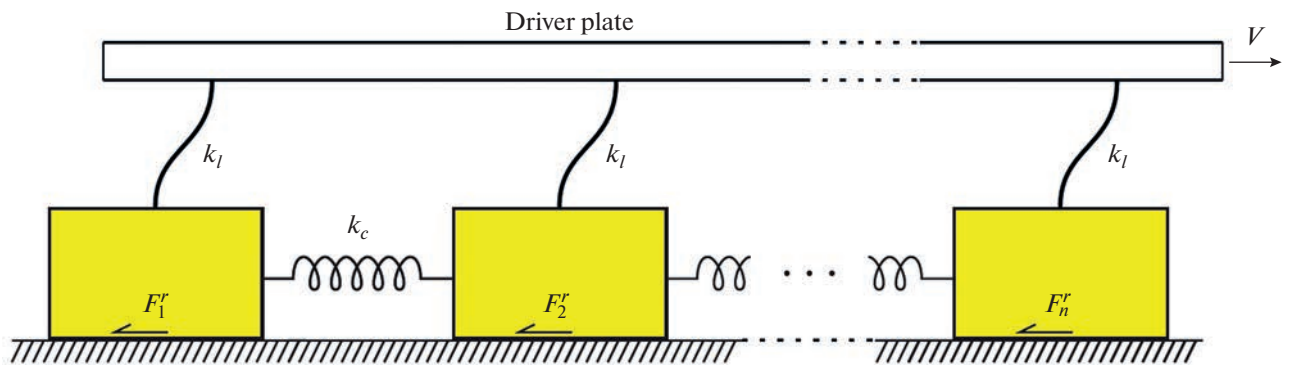


Рис. 8. Одномерная модель проскальзывающих блоков [Burridge, Knopoff, 1967].

Блоки прижаты к плите усилиями P и взаимодействуют с ней по закону сухого трения (рис. 7б), согласно которому при достижении усилием F на контакте критического значения F_{up} сила трения уменьшается до значения F_{dw} , и под действием сброса нагрузки

$$\Delta F = F_{up} - F_{dw}. \quad (1)$$

начинается проскальзывание.

Предположим, что сначала приходит в движение 1-й блок (рис. 10а), который проскальзывает на величину u_1 под действием сброса нагрузки $\Delta F^{(1)} = F_{up}^{(1)} - F_{dw}^{(1)}$.

По мере того, как нагрузка $\Delta F^{(1)}$ передается на вязкоупругую связь между блоками, начинает

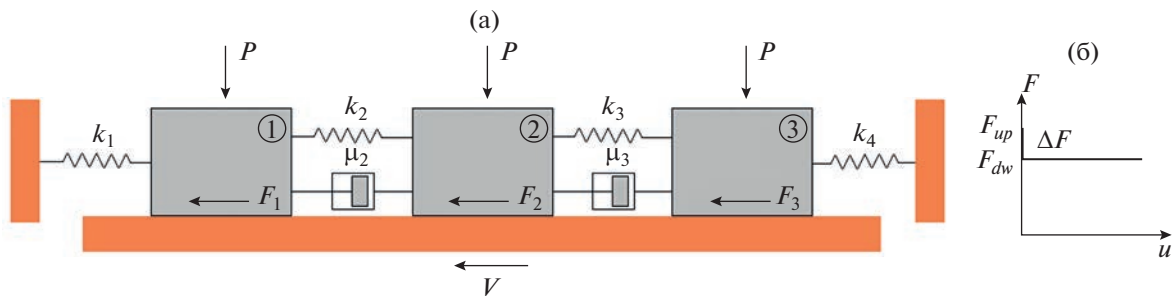


Рис. 9. Модель системы из 3-х блоков (а), взаимодействующих с движущимся основанием по закону сухого трения (б).

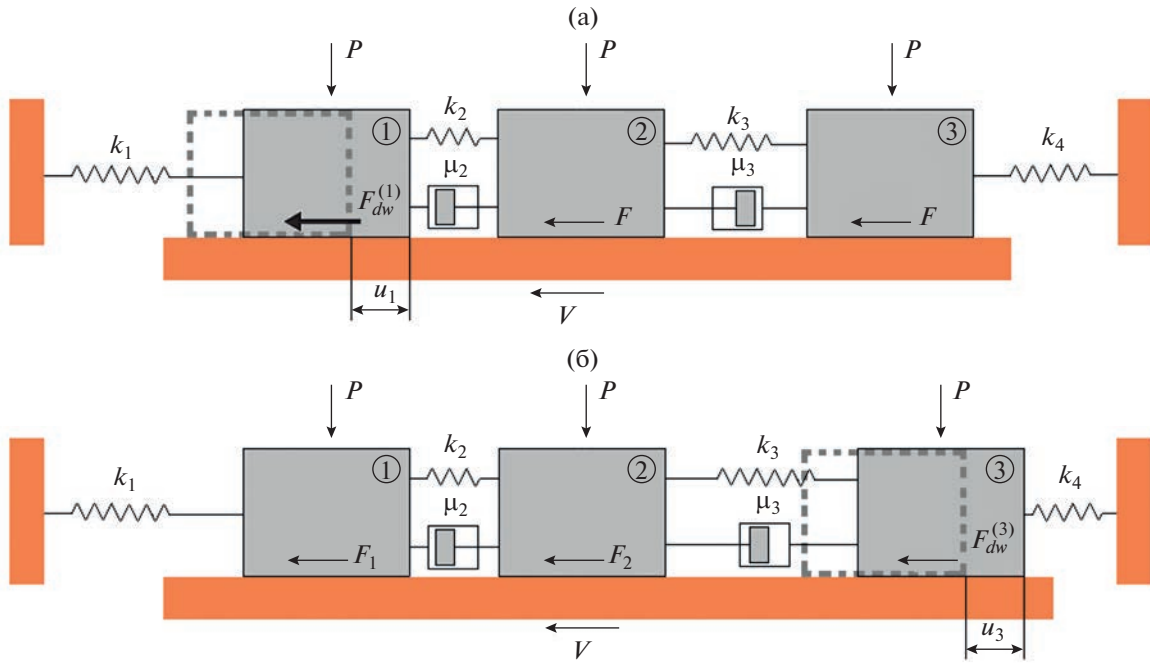


Рис. 10. Проскальзывание 1-го блока (а) и проскальзывание 3-го блока, предшествующие движению 3-го блока (б).

возрастает нагрузка на средний 2-й блок (перемычку). Поскольку $F_{up}^{(2)} > F_{up}^{(1)}$ и $F_{up}^{(2)} > F_{up}^{(3)}$, это не приведет к активизации перемычки. Поэтому через некоторое время растяжение упругой связи k_4 приведет в движение 3-й блок, и он сместится на величину u_3 . В результате к нагрузке на перемычку со стороны 1-го блока добавится давление 3-го блока. Если этого будет достаточно для преодоления силы трения $F_{up}^{(2)}$, то 2-й блок стронется с места. Если нет, то опять повторится нагружение 1-го блока и дальнейшее возрастание нагрузки на перемычку. Описанный выше процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будет преодолено сопротивление 2-го блока.

Выпишем уравнение движения 1-го блока:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{k_1 + k_2}{\mu_2} u_1 + \frac{k_1}{\mu_2} Vt - \frac{\Delta F^{(1)}}{\mu_2} = 0. \quad (2)$$

Его решение, удовлетворяющее условию $u_1 = 0$ при $t = 0$, имеет вид:

$$u_1 = \frac{\Delta F^{(1)}}{k_1 + k_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{k_1 + k_2}{\mu_2} t\right) \right] - \frac{k_1 Vt}{k_1 + k_2}. \quad (3)$$

Движение 1-го блока остановится, когда нагрузка слева на 1-й блок уменьшится:

$$F_{up}^{(1)} - k_1 u_1 = F_{dw}^{(1)}. \quad (4)$$

Согласно (4) время остановки t_1^{st} (stick) найдем из условия

$$\Delta F^{(1)} \left[1 - \exp\left(-\frac{k_1 + k_2}{\mu_2} t\right) \right] - k_1 Vt - \frac{k_1 + k_2}{k_1} \Delta F^{(1)} = 0. \quad (5)$$

Движение 3-го блока удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + \frac{k_4 + k_3}{\mu_3} u_3 + \frac{k_4}{\mu_3} Vt - \frac{\Delta F^{(3)}}{\mu_3} = 0, \quad (6)$$

аналогичному уравнению (2).

Используя решения уравнений (2) и (6), из условия

$$F_{up}^{(2)} - [k_2 u_1(t_1^{st}) + \mu_2 \dot{u}_1(t_1^{st})] - (k_3 u_3 + \mu_3 \frac{\partial u_3}{\partial t}) = F_{dw}^{(2)} \quad (7)$$

найдем время t_3^{sl} (slip), при котором начнется движение 2-го блока.

Зададимся следующими параметрами модели. Модуль Юнга блоков — $E_1 = E_4 = 2 \times 10^{10}$ Па, $E_3 = 1.5 \times 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$, вязкость — $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 6 \times 10^{17}$ Па · с, среднее напряжение — $\sigma_{33} = 1.25 \times 10^8$ Па, $\alpha_{up} = 0.5$ и $\alpha_{dw} = 0.3$ — коэффициенты трения. Длина и ширина блоков $L = 1 \times 10^5$ м и $h = 5000$ м соответственно. Скорость движения плиты $V = 0.5$ м/год.

В этом случае время активации (проскальзывания) 1-го блока $t_{sl}^{(1)} = 0.358$ год. Затем происходит активация 3-го блока, которая длится $t_{sl}^{(3)} = 0.339$ год. Нагрузка, возникающая со стороны 1-го и 3-го блока, приводит в движение 2-й блок (перемычку). Активация 2-го блока длится $t_{sl}^{(2)} = 0.373$ год. Таким образом, использование характерных значений механических и геометрических параметров системы коровых блоков приводит к обоснованным значениям промежутков времени их раскачивания.

В рамках приведенной модели, используя наблюдаемые (по геодезическим данным) и/или смоделированные (с учетом сейсмичности) смещения (или их скорости) для ряда выделенных блоков, путем решения обратной задачи можно уточнить значения параметров, включающих жесткости k и коэффициенты вязкости μ для системы блоков таким образом, чтобы ее наблюдаемое поведение соответствовало экспериментальным параметрам, включая период раскачивания и расстояние между фокусами раскачки. На основании полученных численных оценок установлено, что по одним лишь величинам периода раскачивания достаточно устойчиво определяются только межблоковые вязкости μ , в то время как для других геомеханических параметров системы блоков характерна неоднозначность в достаточно широком интервале значений.

В то же время, они могут быть более надежно определены по временным зависимостям наблюдаемых смещений блоков, а геометрические характеристики системы могут задаваться с использованием доступной геолого-геофизической информации, включая имеющиеся материалы по разломной тектонике исследуемого региона. Возможно, обобщение рассматриваемой модели на случай переменных во времени жесткостей и вязкостей межблоковых связей, что предполагает использование нескольких массивов данных по смещениям (скоростям смещений), отвечающих различным стадиям сейсмического цикла, и получать соответствующие оценки для этих кинематических режимов. Определение указанных величин может быть осуществлено путем решения нелинейной обратной задачи с использованием методов оптимизации. При этом, в качестве функционала невязки может использоваться квадратичная мера расхождения кинематических параметров (скоростей), рассчитанных для модели движения блоков и полученных с помощью GNSS-наблюдений, либо смоделированных в рамках учитывающей текущую сейсмичность геомеханической модели сплошной среды для некоторого набора моментов времени. Регуляризация может быть реализована в виде ограничения области поиска по каждому из параметров.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подход, использованный при построении исходной геомеханической модели Южной Калифорнии [Bondur et al., 2020; 2022], частично включает как элементы каскадно-восходящей модели [Yoon et al., 2019], так и концепции прогрессирующей локализации [Rice, 2017; Ben-Zion, Zaliapin, 2020]. В данном случае поле фоновых напряжений и деформаций, определяемое региональными тектоническими силами и ранее существовавшим распределением разломов, дополняется локальным ослаблением (поврежденностью) и последующим заживлением земной коры, связанными с текущей слабой сейсмичностью, что позволяет моделировать динамические поля напряжений и деформаций для всей области Южной Калифорнии. Фоновая сейсмичность, отражающая непрерывное разрушение земной коры под действием региональных тектонических сил, в основном, связана с разломами Сан-Андреас, Гарлок и Маунт. Однако, поскольку рассматриваемая модель включает данные по сейсмичности малой магнитуды, преобразованные в коэффициент поврежденности горных пород, а фактическая (рассеянная) сейсмичность не ограничивается конкретными разломами (хотя они играют важную роль в распределении стационарных напряжений), расчет эволюции распределенных напряжений и деформаций путем итеративного обновления геомеханических свойств (модулей упругости и т. д.) обеспечивает изменение НДС в достаточно широкой области вокруг будущего разрыва.

Анализ в рамках модели прогрессирующей локализации для Южной Калифорнии, приведенный в работах [Ben-Zion, Zaliapin, 2019; 2020; Kato, Ben-Zion, 2021], свидетельствует о прогрессирующем ослаблении коры вокруг возможных зон вспарывания перед крупными ($M > 7$) событиями, произошедшими в этом регионе за последние десятилетия, с четкой локализацией в течение последних 2–3 лет перед ними. Вышеупомянутые исследования в основном сосредоточены на прямом преобразовании наблюдаемой сейсмичности в объем и локализацию поврежденности горных пород с применением геостатистических оценок [Molchan, Keilis-Borok, 2008] без использования полного геомеханического моделирования для получения распределений НДС.

Описываемая в настоящей работе модель опирается на предложенную нами ранее концепцию, сочетающую принципы каскадно-восходящей модели и прогрессирующей локализации с геомеханическим моделированием параметров НДС с учетом фоновой сейсмичности, позволившую выявить циклический процесс миграции аномальных деформаций на флангах очага готовящегося сильного землетрясения Риджкрест. С дру-

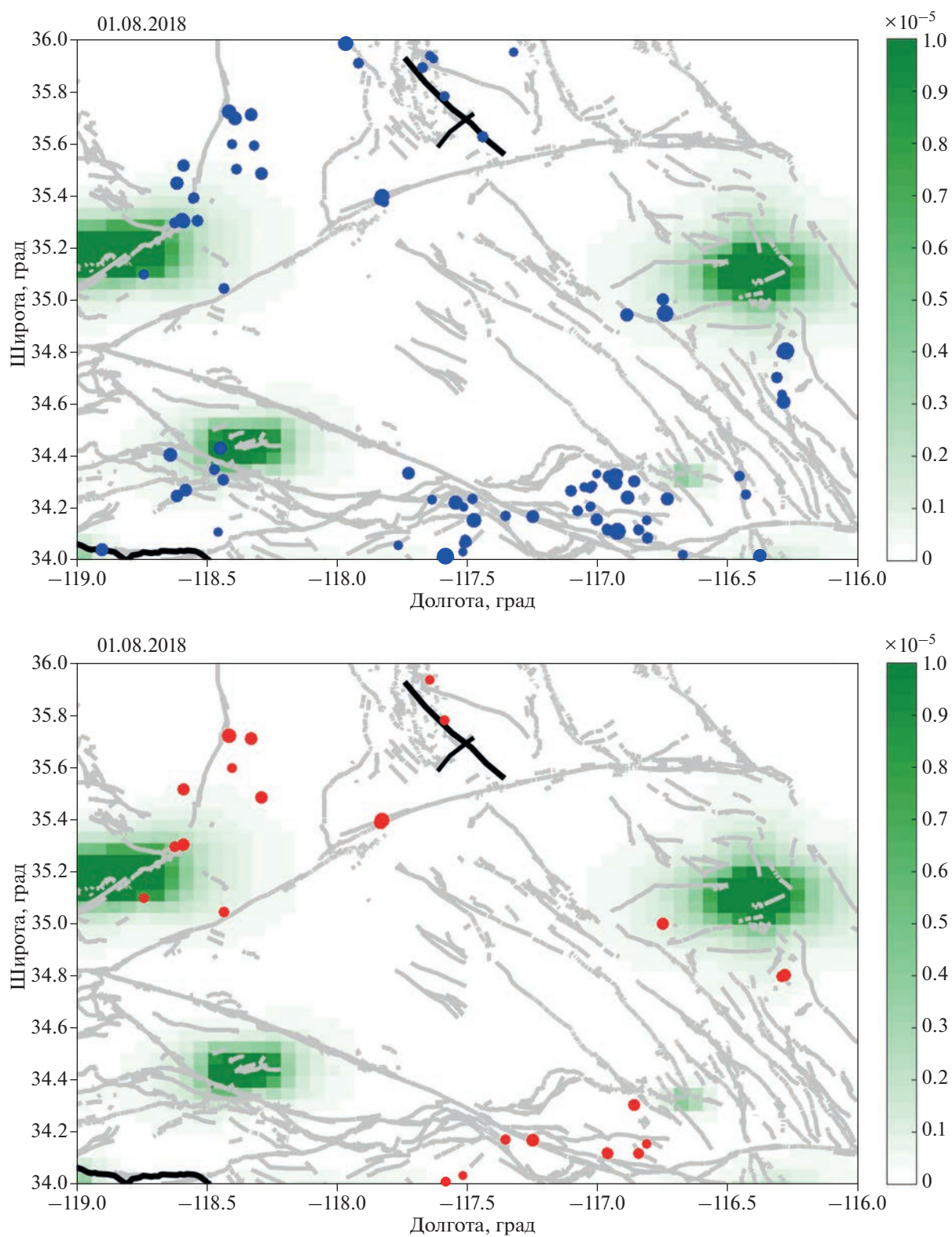


Рис. 11. Распределение максимальных приращений СД на 01.08.2018 г. (зеленые области) и слабой текущей сейсмичности с $M \sim 1-2$ для интервала 3 месяца (синие кружки в верхней части) и для интервала 0.5 мес. (красные кружки в нижней части).

гой стороны, модель “Качели” содержит элементы, близкие к моделям медленного скольжения [Кочарян, 2014].

Выполненные количественные оценки показывают, что обнаруженные периоды процесса “раскачивания” эпицентральной зоны совпадают с периодичностью срыва блоков в рассмотренной детерминированной механической модели. Данный процесс т.н. “раскачивания” является признаком заключительного этапа формирования очага перед началом разрушения перемычки, определяющей само землетрясение. При этом, размеры области “раскачивания” (длина разрыва L) связаны с магнитудой M будущего события, которая может быть оценена, например, в соответствии с формулой Касахары [Касахара, 1985]:

$$\lg L = 3.2 + 0.5M,$$

где L задается в см. В случае землетрясения Риджкест, когда наблюдаемый размер перемычки по данным геомеханического мониторинга составляет порядка 100 км, можно получить оценку максимальной ожидаемой магнитуды около 7.6, что несколько выше фактической. В то же время, вслед за авторами исследования по анализу поверхностных смещений [Chen et al., 2020], можно предположить, что размеры очага и магнитуда события могли оказаться больше фактических, если бы развитие разрыва не было остановлено региональными тектоническими особенностями рассматриваемой территории: разломом Гарлок с одной стороны и зоной вулканов с другой. Таким образом, установление характерных пространственных размеров зон “раскачивания” может дать важнейшую информацию о потенциальной магнитуде готовящегося землетрясения.

Использование созданной модели открывает новые возможности при решении целого ряда обратных задач, направленных на определение характеристик заключительной фазы подготовки землетрясения, важных для краткосрочного прогнозирования.

Следует отметить, что используемые данные при получении результатов по процессу раскачивания, лежащие в основе создания модели “Качели”, были рассчитаны в рамках геомеханической модели, куда вводилась текущая сейсмичность. В процессе развития самой текущей сейсмичности такие особенности динамики НДС выделить весьма затруднительно.

Действительно, слабая сейсмичность, которая связана с локальным разрушением пород, вызывает перераспределение деформаций в сложно построенной земной коре с ее тектоническими особенностями — разломно-блоковой, достаточно мозаичной структурой. Именно в геомеханической модели, в соответствии с развитием сейсмического процесса и особенностями локальной тек-

тоники, выделяются области, где возникают максимумы упругой энергии, касательных напряжений и сдвиговых деформаций. Эти области зачастую не совпадают с местами максимального проявления текущей сейсмичности, а обуславливаются так называемой “чувствительностью” среды, что демонстрируется на рис. 11.

Примеры такой “чувствительности” среды отмечаются в работах [Гохберг и др., 2004; Бондур и др., 2021], когда в модели воздействие в виде локальной поверхностной нагрузки отражается на концентрации процесса приближения пород к пределу прочности на разных глубинах, в достаточно удаленных областях согласно сложному тектоническому строению.

Из приведенного рисунка видно, что для одного достаточно характерного момента времени (01.08.2018 г., примерно за год до землетрясения), пространственное распределение зон с максимальными значениями приращений СД не совпадает с распределением текущей сейсмичности. Надо отметить, что на всем исследуемом промежутке времени 2018–2019 гг. кластер локальной слабой сейсмичности, в основном, приурочен к северо-западному крылу очага. При этом, эффект раскачивания, связанный с последовательной миграцией аномальных зон СД, в определяемой таким образом и подготовленной к разрушению перемычке выявлен при геомеханическом моделировании.

В этом смысле показывается преимущество исследования на модели, с помощью которой удастся выделить особенности динамики НДС, которые могут рассматриваться в качестве новых важных предвестников землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе концепция позволяет глубже понять процессы, происходящие в земной коре перед сильными землетрясениями и связанные с динамикой напряженно-деформированного состояния, мониторинг которого может использоваться для краткосрочного прогнозирования. Важнейшей особенностью выделенного предвестника землетрясения $M = 7.1$ Риджкест 2019 г. является т.н. “раскачивание” на флангах будущего разрыва, ассоциированного с землетрясением, выражающееся в циклическом появлении аномалий деформации сдвига на его северо-западном и юго-восточном продолжениях. Представляется, что подобные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния перед землетрясением Риджкест, выявленные на основе геомеханической модели сплошной среды с динамическим учетом текущей сейсмичности, могут быть объяснены в рамках относительно простых блочных моделей. Дальнейшее развитие такого

подхода может включать оценку геомеханических параметров системы блоков на основе решения обратных задач по экспериментальным и симуляционным данным, а также последующее моделирование ее дальнейшей эволюции с целью краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий.

Следует отметить, что предложенная модель открывает возможности для поиска циклических паттернов типа “качели” в различных геофизических полях, а также данных дистанционного зондирования, включая изображения земной поверхности в видимом и радио-диапазонах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта № 122011800095-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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>
- Бондур В.Г., Гарагаши 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., Гарагаши 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., Гарагаши 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>
- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаши И.А., Алексеев Д.А. Ранние проявления краткосрочных предвестников в динамике напряженно-деформированного состояния Южной Калифорнии // *Физика Земли*. 2021. № 4. С. 78–90.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721040049>
- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаши И.А., Алексеев Д.А., Гапонова Е.В. Изучение формирования очага сильного землетрясения Риджкрест 2019 г. в Южной Калифорнии с использованием геомеханической модели // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2022. Т. 502. № 2. С. 49–54.
<https://doi.org/10.31857/S2686739722020037>
- Гарагаши И.А. Использование азимутальных вариаций скоростей сейсмических волн для мониторинга сейсмической опасности на Камчатке. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: 2000. С. 164–175.
- Гохберг М.Б., Гарагаши И.А., Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А., Юнга С.Л. Геомеханическая модель сейсмического кластера “Чайна-Лейк” Южной Калифорнии. Исследования в области геофизики. Сборник статей к 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта / Глико А.О. (ред.) М. 2004. С. 90–98.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.
- Керман В.И., Лобковский Л.И. Численное моделирование сейсмостектонического процесса в островных дугах и активных континентальных окраинах по клавишной схеме сильнейших землетрясений // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1988. № 3. С. 34–46.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А., Захаров В.С., Брянцева Г.В. О геологических и физических механизмах природных процессов в задачах динамической геологии // *Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология*. 2015. № 4. С. 40–48.
- Кочарян Г. Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. . № 4. С. 863–891.
- Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Гарагаши И.А., Баранов Б.В., Стеблов Г.М. Постсейсмические движения после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. на различных стадиях сейсмического цикла // *Докл. РАН*. 2017. Т. 473. № 3. С. 104–109.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестников землетрясений. Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6–29.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Ben-Zion Y., Zaliapin I. Spatial variations of rock damage production by earthquakes in southern California // *Earth and Planetary Science Letters*. 2019. V. 512. P. 184–193.
- Ben-Zion Y., Zaliapin I. Localization and coalescence of seismicity before large earthquakes // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 223. P. 561–583.
- 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. 8: 571700.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- 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 // *Russian J. Earth Sciences*. 2022. V. 22. ES5002.
- Brown S.R., Scholz C.H., Rundle J.B. A simplified spring-block model of earthquakes // *Geophysical Research Letters*. 1991. V. 18. P. 215–218.
- Burridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1967. V. 57. № 3. P. 341–371.
- Carlson J.M., Grannan E.R., Swindle G.H. Self-organizing systems at finite driving rates // *Physical Reviews*. 1993. V. E47. P. 93–105.

- 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 Communications*. 2020. V. 11. P. 22.
- Dieterich J.H. Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength // *Tectonophysics*. 1992. V. 211. P. 115–134.
- Huang J., Turcotte D.L. Are earthquakes an example of deterministic chaos? // *Geophysical Research Letters*. 1990. V. 17. P. 223–226.
- Kato A., Ben-Zion Y. The generation of large earthquakes // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. V. 2. P. 26–39.
- Molchan G., Keilis-Borok V. Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect // *Geophysical J. International*. 2008. V. 173. P. 1012–1017.
- Narkounskaia G., Turcotte D.L. A cellular-automata, slider-block model for earthquakes. I. Demonstration of chaotic behavior for a low order system // *Geophysical J. International*. 1992. V. 111. P. 250–258.
- Rice J.R. Heating, weakening and shear localization in earthquake rupture // *Philosophical Transactions. Series a, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. 2017. V. 375. PMID 28827427.
- Turcotte D.L. Crustal deformation and fractals, a review. *Fractals and dynamic systems an geosciences* / J.H. Kruhl (ed.). 1994. P. 7–23.
- Yoon C.E., Yoshimitsu N., Ellsworth W.L., Beroza G.C. Fore-shocks and mainshock nucleation of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake // *J. Geophysical Research. Solid Earth*. 2019. V. 124. P. 1569–1582.

Migration of Anomalous Displacements on the Flanks of a Preparing Earthquake Source: A Swing Model

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

^a*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, 105064 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, 141701 Russia*

*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

The geomechanical modeling results on the stress-strain state dynamics before the 2019 $M = 7.1$ Ridgecrest earthquake, Southern California, show the alternating development of maximum displacements at the fault's ends, which simulates the process of “swinging” of the epicentral zone of the earthquake. These results together with the existing theoretical ideas about the block structure of the Earth's crust and the corresponding connections between blocks are used to construct a geomechanical “swing” model based on the stick-slip motion of three interconnected blocks. The model parameters are related to the rheological properties of the Earth's crust in the region of the rupture of the bridging isthmus which determines the source size of the seismic event.

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