

УДК 551.24.02:551.243

ЛОКАЛЬНАЯ АНОМАЛИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПЕРЕД СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ($M = 7.1$) 05.07.2019 г. В РАЙОНЕ г. РИДЖКРЕСТ (ЮЖНАЯ КАЛИФОРНИЯ)

© 2020 г. Академик РАН В. Г. Бондур^{1,*}, М. Б. Гохберг^{1,2}, И. А. Гарагаш^{1,2}, Д. А. Алексеев^{1,2,3,4}

Поступило 09.09.2019 г.

После доработки 29.09.2019 г.

Принято к публикации 09.10.2019 г.

С использованием метода, основанного на разработанной геомеханической модели и параметрах текущей сейсмичности, проанализирована эволюция напряженно-деформированного состояния земной коры в Южной Калифорнии в период подготовки к сильному землетрясению с магнитудой $M = 7.1$ (с 01.01.2019 г. по 15.08.2019 г.), состоявшемуся 05.07.2019 г. в районе г. Риджкрест. Выявлены аномалия максимальных значений параметра близости горных пород к пределу прочности и закономерность миграции данной аномалии за этот период времени. Такая закономерность подтверждается и для землетрясения с магнитудой 7.2, произошедшего в Южной Калифорнии 04.04.2010 г. Характер миграции таких аномалий и их локализация (в течение нескольких месяцев) вблизи эпицентров подобных сейсмических событий указывают на процессы подготовки к землетрясениям и могут служить их предвестниками. Это свидетельствует о возможности использования предложенного метода для мониторинга сейсмоопасных территорий с целью прогноза сильных землетрясений.

Ключевые слова: геомеханическая модель, земная кора, напряженно-деформированное состояние, сейсмоопасные территории, землетрясения, предвестники, мониторинг

DOI: 10.31857/S2686739720010016

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения являются одним из самых опасных видов природных катастроф, вызывающих большое количество человеческих жертв и наносящих огромный материальный ущерб [1, 2]. Поэтому решение проблемы их предсказания для предупреждения и снижения вызываемых ими последствий является актуальной задачей [3, 4]. Однако, несмотря на значительные усилия и достигнутые успехи долгосрочного (на годы вперед) прогноза землетрясений [3, 5], до сих пор не достигнута высокая точность среднесрочного (до года) прогноза и не решена проблема краткосрочного (от нескольких часов до нескольких дней)

прогнозирования значительных сейсмических событий.

Для решения этой проблемы необходимо регистрировать различные предвестники землетрясений, проявляющиеся, например, в изменении структуры линеаментов, регистрируемых по космическим изображениям [6, 7], в аномалиях различных физических полей [8], в том числе в вариациях ионосферных параметров [9, 10] в период подготовки и протекания сейсмических событий. При этом необходимо развивать технологии мониторинга сейсмоопасных территорий с использованием различных подходов [7–9, 11].

Одним из наиболее сейсмоопасных районов земного шара, для которого организовано получение наиболее полной сейсмологической информации, является Южная Калифорния [12, 13]. Поэтому эта территория является своеобразным международным полигоном для исследования землетрясений.

В Южной Калифорнии вблизи г. Риджкрест 5 июля 2019 г. в 03:19 UTC произошло одно из крупнейших за последнее время в этом регионе землетрясений с магнитудой $M = 7.1$ (координаты эпицентра 35.766° с.ш., 117.605° з.д.). Данному сейсмическому событию предшествовал ряд форшоков, первый и наиболее сильный из них имел

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

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

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

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

магнитуду $M = 6.4$. Этим сейсмическим событиям предшествовали аномалии напряженного состояния земной коры. Подобная аномалия выявлена и для землетрясения с магнитудой $M = 7.2$, произошедшего в Южной Калифорнии 04.04.2010 г.

Настоящая работа посвящена описанию и анализу аномалий напряженного состояния земной коры, связанных с данными сейсмическими событиями в Южной Калифорнии, обнаруженных с использованием метода, основанного на разработанной геомеханической методике [10, 14, 15].

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и в Научно-исследовательском институте аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС” разработаны метод и технология ежемесячного анализа динамики параметров напряженного состояния земной коры, основанные на детальной геомеханической модели, которая используется для территории Южной Калифорнии. Входными данными для модели является текущая сейсмичность в движущемся с заданным шагом по времени трехмесячном окне, в том числе взятая из каталога Геологической службы США (USGS) [10, 14]. В данной модели каждое землетрясение рассматривается как новый дефект земной коры, меняющий в своей окрестности эффективные механические свойства горной породы. Это вызывает изменение напряженного состояния земной коры, перераспределение деформаций и плотности упругой энергии. В результате прочность земной коры на отдельных участках может уменьшиться, и это провоцирует землетрясения [10, 14].

Для оценки этого процесса предложен параметр D , являющийся мерой близости горных пород к пределу прочности [14, 15]. В случае если исходное напряженное состояние меняется в результате сейсмического процесса и главные напряжения получают приращения $\sigma_1^* = \sigma_1 + \Delta\sigma_1$, $\sigma_3^* = \sigma_3 + \Delta\sigma_3$, то напряженное состояние может либо приблизиться к пределу прочности, либо удалиться от него на величину [14, 15]

$$D = \left(\frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{2} + \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3}{2} \sin \varphi \right),$$

где φ — угол трения, σ_1 , σ_3 — главные напряжения.

Подробно данный метод и основанная на нем технология, а также примеры их применения начиная с 2009 года описаны в работах [10, 14, 15].

При проведении исследований сейсмического события с магнитудой $M = 7.1$, произошедшего 05.07.2019 г. в 03:19 UTC в Южной Калифорнии (район г. Риджкрест) по сетке 5×5 км с шагом по времени 0.5 месяца рассчитывались следующие параметры [10, 14, 15]: плотности упругой энер-

гии, касательные напряжения, смещения земной коры, а также параметр D , характеризующий меру близости горных пород к пределу прочности. Расчеты проводились для области, ограниченной координатами $35^\circ - 36^\circ$ с.ш. и $117^\circ - 118^\circ$ з.д. для выделенного в модели слоя верхней части земной коры на глубине от 3 до 7 км, где концентрируется основная часть сейсмических событий на территории Южной Калифорнии [4, 12], включая исследуемое землетрясение.

На основании результатов проведенных расчетов формировались пространственно-временные распределения этих параметров для исследуемого района на территории Южной Калифорнии за период времени с начала января 2019 г. до середины августа 2019 г.

Исследование пространственно-временного распределения параметра D позволяло прогнозировать усиление сейсмической активности в исследуемом регионе и выделять места, в которых могли происходить землетрясения с удовлетворительной сходимостью в анализируемом интервале времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На основании результатов анализа полученных пространственно-временных распределений параметра D на территории Южной Калифорнии были обнаружены аномалии напряженного состояния земной коры перед всеми землетрясениями с магнитудами $M = 5.5 - 7.2$, которые анализировали начиная с 01.01.2019 г. до 15.08.2019 г. на разломе Сан-Андреас вблизи Мексиканской границы. При этом в период сейсмического затишья (при отсутствии землетрясений с магнитудами $M > 5.5$) в анализируемый интервал времени такие аномалии не отмечались, что указывает на отсутствие “ложных” тревог.

Следует отметить, что в отличие от исследованных нами предшествующих землетрясений, происходивших на территории Южной Калифорнии [14, 15], сейсмическое событие, состоявшееся 05.07.2019 г., произошло в северной ее части, которая обладает более сложной разломной тектоникой [12]. Эпицентральная область исследуемого землетрясения находилась на северной границе анализируемого участка территории, что несколько ограничивало использование данных по текущей сейсмичности. Несмотря на это, за полгода до произошедшего сейсмического события была выделена локальная аномалия напряженного состояния земной коры в непосредственной близости от эпицентра будущего землетрясения.

В табл. 1 приведены результаты расчетов максимальных абсолютных значений параметра D , позволивших выявить аномалии напряженного

состояния земной коры для исследуемого участка территории. Расчеты проводились с дискретностью 0.5 месяца в период времени с 01.01.2019 г. по 15.08.2019 г. для выделенного в модели второго слоя земной коры на глубинах от 3 до 7 км.

На рис. 1 показана последовательная миграция максимумов вариаций градиентов напряженного состояния земной коры, выявленных с помощью максимальных значений параметра D , рассчитанных начиная с 01.01.2019 г. до 15.08.2019 г. Рисунок 1 построен для области, ограниченной координатами 35° – 36° с.ш. и 117° – 118° з.д., где 05.07.2019 г. произошло землетрясение с магнитудой $M = 7.1$. Это землетрясение предварялось сильным форшоком с магнитудой $M = 6.4$, состоявшимся 04.07.2019 г. Эпицентры этих сейсмических событий показаны на рис. 1 звездочками. Серыми зонами и штриховыми линиями на этом рисунке показаны главные разломы.

Анализ миграции аномалии напряженного состояния земной коры, выделенной по максимуму абсолютных значений параметра D , свидетельствует о том, что в период времени с 1.01.2019 г. по 1.04.2019 г. эта миграция на уровне фоновых значений параметра D началась с юго-востока, последовательно приближаясь к эпицентрам будущих сейсмических событий. В мае 2019 г. (т.е. за два месяца до исследуемого сейсмического события) эта аномалия достигла максимального значения 1.1633×10^6 (табл. 1), сконцентрировавшись в 30–35 км к западу от эпицентров будущих землетрясений (рис. 1).

Анализ абсолютных значений параметра D показал, что в данной области породы верхней части земной коры на глубине около 7 км 1 мая 2019 г., т.е. за 0.5 месяца до землетрясения приблизились к пределу прочности на величину 1.1633×10^6 Па, что существенно превысило фоновые значения (235.31) 15 марта 2019 г. При этом зона максимума напряженного состояния земной коры локализовалась в одной и той же области в течение 2.5 месяцев (в апреле–июне 2019 г.). Это указывает на связь с подготовкой крупного сейсмического события. Фоновая миграция носит хаотический характер со сравнительно быстрым смещением во времени на расстояния до первых сотен километров (рис. 1).

Непосредственно перед сейсмическим событием и после него, аномалия максимальных значений параметра D покидает область своей устойчивой локализации, в пределах которой она находилась в период с апреля по июнь 2019 г., и область максимума параметра D вновь начинает “хаотические” перемещения; при этом расстояния между ее последовательными положениями достигают 50–70 км (рис. 1).

Влияние произошедшего землетрясения и следовавших за ним афтершоков (рис. 1) приво-

Таблица 1. Оценки максимальных значений параметра D для второго слоя модели за период подготовки и протекания сейсмического события с магнитудой $M = 7.1$ в районе г. Риджкросс (Южная Калифорния) (01.01.2019 г.–15.08.2019 г.)

Дата 2019 г.	D , Па
01/01	1.0561×10^5
15/01	5.9859×10^4
01/02	8.5649×10^4
15/02	7.3085×10^4
01/03	4.6335×10^4
15/03	2.3531×10^2
01/04	3.5788×10^2
15/04	3.3749×10^5
01/05	1.1633×10^6
15/05	6.9915×10^5
01/06	4.5523×10^5
15/06	2.2012×10^2
01/07	1.6001×10^4
15/07	$\sim 10^7$
01/08	$\sim 10^5$
15/08	$\sim 5 \times 10^4$

дит к тому, что амплитуда максимума параметра D на 15.07.2019 (сразу после события) в присутствии афтершоков резко возрастает, достигая пикового значения около 10^7 Па, а в последующем убывает до фоновых значений: 01.08.2019 – до $\sim 10^5$ Па, а 15.08.2019 до $\sim 5 \times 10^4$ Па.

В табл. 2 и на рис. 2 для сравнения приведены подобные результаты, полученные для землетрясения с магнитудой $M = 7.2$, состоявшегося 04.04.2010 г. в Южной Калифорнии с координатами эпицентра 32.26° с.ш., 115.29° з.д. [14, 15].

В табл. 2 представлены результаты расчетов максимальных нормированных значений параметра D для исследуемого участка территории Южной Калифорнии. Расчеты проводились с дискретностью 0.5 месяца в период времени с 01.01.2010 г. по 01.05.2010 г. для выделенных в модели верхних слоев (1–3) земной коры на глубинах от 3 до 7 км.

На рис. 2 приведена миграция максимумов вариаций градиентов напряженного состояния земной коры (по параметру D) в период времени с 01.01.2010 г. по 01.05.2010 г. в окрестности эпицентра землетрясения, которое произошло 04.04.2010 г. в Южной Калифорнии (звездочка).

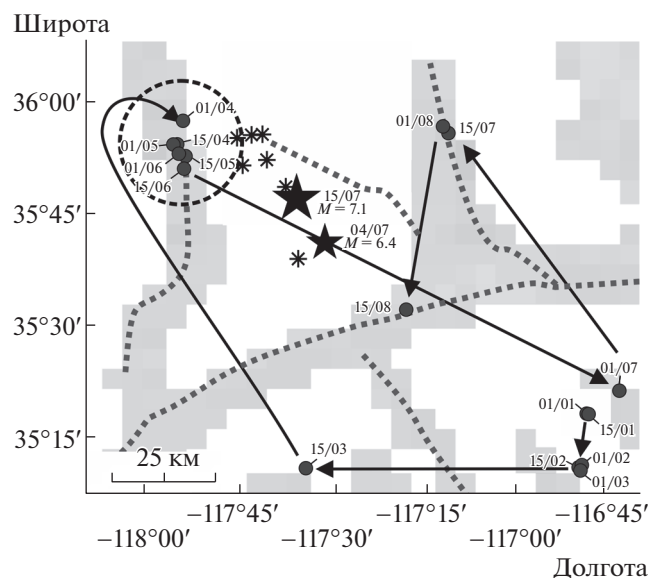


Рис. 1. Миграция максимумов вариаций градиентов напряженного состояния земной коры (по параметру D) в период времени с 01.01.2019 г. по 15.08.2019 г. (темные кружки) в окрестности эпицентров землетрясения с магнитудой $M = 7.1$, состоявшегося 05.07.2019 г., и форшока с магнитудой $M = 6.4$, произошедшего 4.07.2019 г. (показаны звездочками ★). Серыми областями и пунктирными линиями показаны основные разломные зоны. Значками * показаны афтершоки.

Серыми зонами и штриховыми линиями на рис. 2 показаны главные разломы.

Анализ рис. 1 и 2, а также табл. 1 и 2 свидетельствует о том, что, несмотря на различия в разломной тектонике районов, где произошли землетрясения в 2010 и в 2019 годах, характер поведения

Таблица 2. Оценки максимальных нормированных значений параметра D за период подготовки и протекания сейсмического события с магнитудой $M = 7.2$ в Южной Калифорнии с 01.01.2010 г. по 01.05.2010 г.

Дата 2010 г.	D , Па	Слой модели
01/01	0.65	3
15/01	0.7	3
15/01	0.8	3
01/02	1	3
15/02	0.65	2
01/03	0.55	2
15/03	0.5	3
01/04	0.9	3
15/04	1	1
01/05	0.9	3

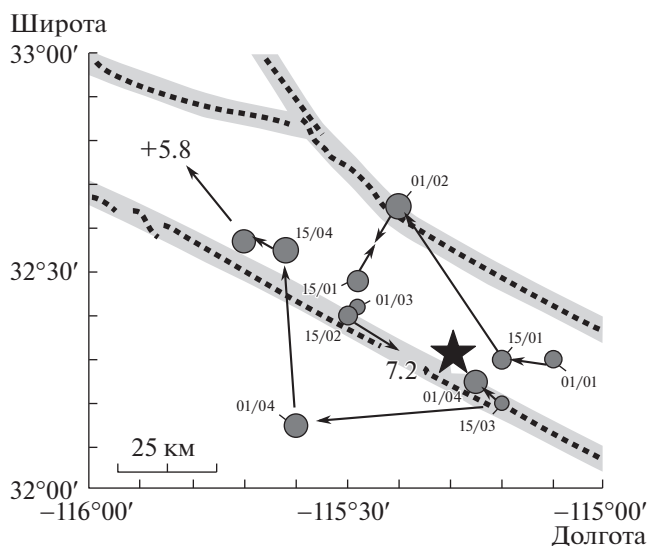


Рис. 2. Миграция максимумов вариаций градиентов напряженного состояния (по параметру D) в период времени с 01.01.2010 г. по 01.05.2010 г. (темные кружки) в окрестности эпицентра землетрясения с магнитудой $M = 7.2$, состоявшегося 04.04.2010 г. в Южной Калифорнии с координатами эпицентра 32.26° с.ш., 115.29° з.д. (звездочка). Серыми зонами и пунктирными линиями показаны главные разломы. Знак “+” соответствует времени оценки после события.

зоны максимальных значений D является сходным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря непрерывным расчетам параметров напряженного состояния земной коры с использованием разработанной геомеханической модели [10, 14, 15] и информации о текущей сейсмичности удалось обнаружить локальную аномалию напряженного состояния земной коры, которая возникла в окрестности первых десятков километров от эпицентра данного сильного землетрясения с магнитудой $M = 7.1$ в районе г. Риджкрест за полгода до него. Эти аномалии и их миграции могут рассматриваться как предвестники сейсмического события.

Подобная аномалия и ее миграция выявлены и для землетрясения с магнитудой $M = 7.2$, произошедшего в Южной Калифорнии 04.04.2010 г. с координатами эпицентра 32.2° с.ш., 115.29° з.д.

Таким образом, на примере сильных землетрясений, состоявшихся в Южной Калифорнии 05.07.2019 г. в районе г. Риджкрест (магнитуда $M = 7.1$) и 04.04.2010 г. (магнитуда $M = 7.2$) показано, что предложенный метод, основанный на разработанной геомеханической модели, может использоваться для мониторинга сейсмоопасных территорий с целью прогнозирования сильных землетрясений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема № ON58–2019–0030, Государственная регистрация № АААА–А19–119081390037–2), а также (тема № АААА–А17–117061950051–8, тема № АААА–А17–117051110248–3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука. 1985. 408 с.
2. *Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.
3. *Моги К.* Предсказание землетрясений // М.: Мир. 1988. 382 с.
4. *Jordan T. H., Jones L. M.* Operational Earthquake Forecasting: Some Thoughts on why and how // *Seismol. Res. Lett.* 2010. V. 81. P. 571–574.
5. *Molchan G., Keilis-Borok V.* Seismology Earthquake Prediction: Probabilistic Aspect // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173. P. 1012–1017.
6. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // *ДАН.* 2005. Т. 402. №1. С. 98–105.
7. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // *Исследование Земли из космоса.* 2007. № 1. С. 47–56.
8. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с., ил.
9. *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.
10. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., и др.* Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // *ДАН.* 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
11. *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>
12. *Field E., Dawson T., Felzer K., Frankel A., Gupta V., Jordan T.H., Parsons T., Petersen M., Stein R., Weldon R., Wills C.* Uniform California Earthquake Rupture Forecast. Version 2 // *Bull. Seismol. Soc. America.* 2009. V. 99. P. 2053–2107.
13. *Chen P., Zhao L., Jordan T. H.* Full 3D-Tomography for Crustal Structure of the Los Angeles Region // *Bull. Seismol. Soc. America.* 2007. V. 97. P. 1094–1120.
14. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. и др.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // *ДАН.* 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
15. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. и др.* 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>

LOCAL ANOMALY OF THE CRUST'S STRESS STATE BEFORE THE STRONG $M = 7.1$ RIDGECREST EARTHQUAKE (SOUTHERN CALIFORNIA) ON JULY 5, 2019

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

^a AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation

^b O. Yu. Shmidt Institute of the Earth's Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c Moscow Physical-Technical Institute (State University), Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

^d P.P. Shirshov Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

The evolution of the stress-strain state of the crust in Southern California was analyzed for the period of preparation (from January 1, 2019 to August 15, 2019) for a strong $M = 7.1$ earthquake occurred on July 5, 2019 near Ridgecrest using the method based on the developed geomechanical model and current seismicity data. An anomaly of the maximum values of the ultimate strength parameter of rocks and the consistent pattern of migration of this anomaly over this period were revealed. This pattern is the same for the other $M = 7.2$ earthquake occurred in Southern California on April 4, 2010. The nature of migrations of such anomalies and their localization (for several months) near epicenters of such seismic events indicates the processes of earthquake preparation and can serve as their precursors. This demonstrates the possibility of using the proposed method for monitoring of seismic areas in order to predict strong earthquakes.

Keywords: geomechanical model, crust, stress-strain state, seismic danger areas, earthquakes, precursors, monitoring