

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ ЛИНЕАМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КАЛИФОРНИИ С МАГНИТУДАМИ 6.4 И 7.1

© 2019 г. Е. В. Гапонова^{1,*}, А. Т. Зверев^{1,2,**}, М. Н. Цидилина¹

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

**E-mail: zverev@miigaik.ru

Поступила в редакцию 21.11.2019 г.

В настоящей работе на основании данных дистанционного зондирования исследованы изменения линеаментных систем при подготовке и протекании сильных землетрясений, с магнитудами $M = 7.1$ и $M = 6.4$, произошедших в Калифорнии (США) в июле 2019 г. Проанализирован ряд космических изображений начиная с 01.01.2019 г. по 12.08.2019 г., а также данные о сейсмической обстановке в регионе. Выявлены предвестниковые изменения линеаментных систем, проявляющиеся в роз-диаграммах региональных линеаментов и в суммарной длине локальных линеаментов разных направлений. Резкое изменение количественных характеристик роз-диаграмм линеаментов проявлено, начиная с 05.06.2019 г., т.е. за месяц до землетрясений 04.07.2019 г. и 05.07.2019 г. Установлено, что максимальная длина линеаментов северо-западного (продольного) и северо-восточного (поперечного) простираний приходится на дату 30.06.2019 г., т.е. за несколько дней до сейсмических событий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, космические изображения, землетрясения, предвестник, линеаменты

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019636-47>

ВВЕДЕНИЕ

Методы дистанционного зондирования все более широко используются для мониторинга и прогнозирования различных природных катастроф таких, как землетрясения (Бондур, Зверев, 2005а, б, в; Бондур, Смирнов, 2005; Бондур и др., 2007, 2010, 2014, 2016 а, в; Пулинец и др., 2010; Bondur, Smirnov, 2005; Bondur et al., 2017), тайфуны (Бондур и др., 2008 а, б; 2009; Бондур, Пулинец, 2012), природные пожары (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016 б; Бондур, Гинзбург, 2016) и др.

Землетрясения являются одними из наиболее мощных, внезапных и разрушительных природных явлений, способных нанести огромный социальный, экономический и экологический ущерб (Моги, 1988; Соболев, Пономарев, 2003; Бондур и др., 2009; Киссин, 2009, Аюбов, 2016).

Когда говорят о прогнозировании землетрясений, то подразумевают наличие прогностических сведений о трех факторах: месте, времени и силе землетрясения (Моги, 1988; Соболев Г.А., Пономарев, 2003).

Спрогнозировать время и место их появления и тем более предотвратить их развитие чрезвычайно трудно, а чаще всего невозможно, поэтому поиск надежных предвестников до сих пор является

весьма актуальной задачей (Соболев Г.А., Пономарев, 2003; Бондур, Зверев, 2005 а, б, в, 2007; Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005; Пулинец и др., 2010; Бондур и др., 2007, 2009, 2010, 2014, 2016а, в; Bondur, Kuznetsova, 2005; Киссин, 2009; Кузьмин, 2014). Прогнозированием землетрясений занимаются многие ученые в разных странах мира, особенно подверженных катастрофическим землетрясениям. Однако, несмотря на все усилия, эта проблема еще далека от разрешения.

Современные спутниковые методы изучения землетрясений опираются на различные физические процессы, сопровождающие землетрясения. Конечная цель исследований — понимание физики землетрясений, а ее инновационная составляющая — прогноз землетрясений (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005; Бондур и др., 2007, 2010, 2016 а, в; Бондур, Воронова, 2012; Пулинец и др., 2010; Аюбян и др., 2010; Bondur et al., 2017; Зверев, 2013). В настоящее время широкое развитие получили методы дистанционного зондирования для наблюдения за деформациями земной поверхности, тепловыми и электромагнитными явлениями в сейсмическом цикле (Бондур, Зверев, 2005 а, б, в, 2007; Бондур и др., 2016 а, в; Зверев, 2013). Деформации имеют место на всех этапах сейсмического цикла, часто видны



Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений с магнитудой ≥ 4 с 1 января 2019 г. (звездами обозначены сильные землетрясения с M 6.4 и 7.1).

невооруженным глазом и легко фиксируются как наземными, так и дистанционными методами. Спутниковые методы изучения сейсмических деформаций можно разделить на: структурные (оптические и радиолокационные), радарную интерферометрию, методы определения смещений с помощью систем глобального позиционирования, гравитационные измерения (Бондур и др., 2009; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур, Старченков, 2001; Зверев, 2013). Одним из перспективных дистанционных структурных методов изучения деформаций земной поверхности является автоматизированный линеаментный анализ космических изображений (Бондур, Зверев, 2005а, б, в, 2007; Бондур и др., 2016 в; Bondur, Kuznetsova, 2005).

Космические изображения охватывают обширную территорию, что позволяет по одному и тому же изображению одновременно изучать разные сейсмогенные участки. Таким образом, анализируемые потоки космических изображений позволяют обеспечить реальный сейсмический

мониторинг, основывающийся на использовании однотипной информации и одновременном слежении за всей сейсмоопасной территорией на протяжении достаточно значительного периода времени. Существенное значение имеет периодичность космической съемки, т.е. получение изображений через определенные промежутки времени, что способствует изучению динамики геологических структур.

В настоящей работе приводятся результаты линеаментного анализа космических изображений в период подготовки и протекания сильных землетрясений, произошедших в Калифорнии в начале июля 2019 г.

ОПИСАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

В начале июля 2019 г. в Калифорнии неподалеку от города Риджкрест произошло два сильных землетрясения магнитудами 6.4 и 7.1 (обозначенные звездами на рис. 1).

Первое землетрясение магнитудой 6.4 произошло 04.07.2019 г. Эпицентр располагался в 195 км к северо-западу от Лос-Анджелеса на глубине 10.5 км (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci38443183/executive>). Землетрясение сопровождалось более 150 мелкими подземными точками магнитудами от 2.5 до 4.5 с гипоцентрами от 0 до 16 км (рис. 2 а).

Это землетрясение являлось форшоком для второго более сильного землетрясения магнитудой 7.1, которое произошло 05.07.2019 г. на юге Калифорнии (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci38457511/executive>). Эпицентр этого землетрясения располагался в 184 км от города Сан-Бернардино на глубине 8 км. Землетрясение сопровождалось более 500 мелкими подземными

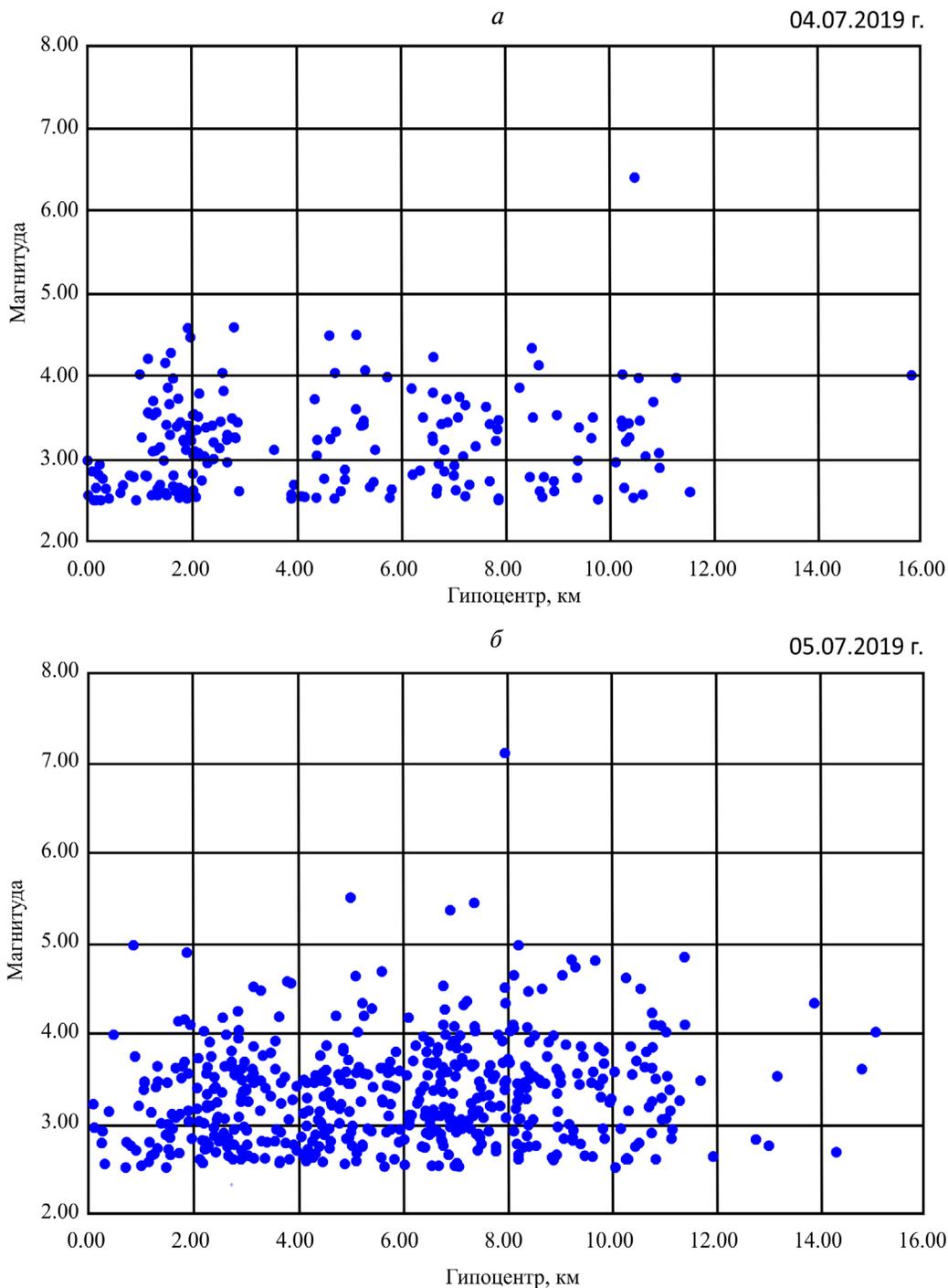


Рис. 2. Землетрясения, произошедшие (а) 4 июля 2019 г. и (б) 5 июля 2019 г. с разными магнитудами и гипоцентрами.

точками магнитудами от 2.5 до 5.5 с гипоцентрами от 0 до 15 км (рис. 2 б). Расстояние между этими двумя сейсмическими событиями составляло примерно 11 км.

В результате землетрясений, произошедших 04.07.2019 г. и 05.07.2019 г., на фундаментах зданий появились трещины, разрушены несколько жилых домов, частично разрушены дороги, есть обрушения опорных стенок, случились пожары.

Землетрясение, произошедшее 05.07.2019 г. стало самым сильным в штате Калифорния с 1999 г., когда произошло землетрясение с магнитудой 7.1.

В целом 2019 г. в Калифорнии отмечен повышенной сейсмической активностью. Сейсмический рой небольших землетрясений магнитудами 2.5–4 являлся предвестником мощных толчков 4, 5 июля (рис. 3).

Анализ распределения роя землетрясений по магнитудам накануне 04.07.2019 г., начиная с января 2019 г., не показывает их усиления. Явно преобладали толчки с магнитудами 2.5 до 3, реже 4. Распределение их по датам также достаточно равномерно. Лишь 4 и 5 июля сила этих толчков и их частота резко увеличились, образуя рой повторных толчков (афтершоков), состоящих из сотен землетрясений с магнитудами 3, 4, реже 5.

Ниже рассмотрены статистические характеристики линеаментов, изменения которых вызвано сильными землетрясениями, произошедшими 04.07.2019 г. и 05.07.2019 г.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления аномалий линеаментных систем по космическим изображениям в качестве исходных данных подбирались изображения дневной съемки, полученные аппаратурой MODIS (спутник Terra/Aqua) с 01.01.2019 г. с пространственным разрешением 250 м.

Анализ многоспектральных космических изображений, полученных аппаратурой MODIS в трех зонах оптического диапазона спектра показал (Бондур, Зверев, 2005а, б, в, 2007), что, в зеленой части спектра (520–600 нм) наиболее четко (в количественном и качественном отношении) выражены локальные линеаменты (штрихи), а в ближней инфракрасной зоне (780–860 нм) — региональные (сквозные) линеаменты. Космические изображения, полученные в красной зоне спектра (630–690 нм), по своим информационным свойствам занимают промежуточное положение между зеленой зоной и ближней ИК-зоной спектра, т.е. локальные линеаменты проявлены лучше, чем в ближней ИК-зоне, а региональные — лучше, чем в зеленой зоне. Во всех изученных случаях

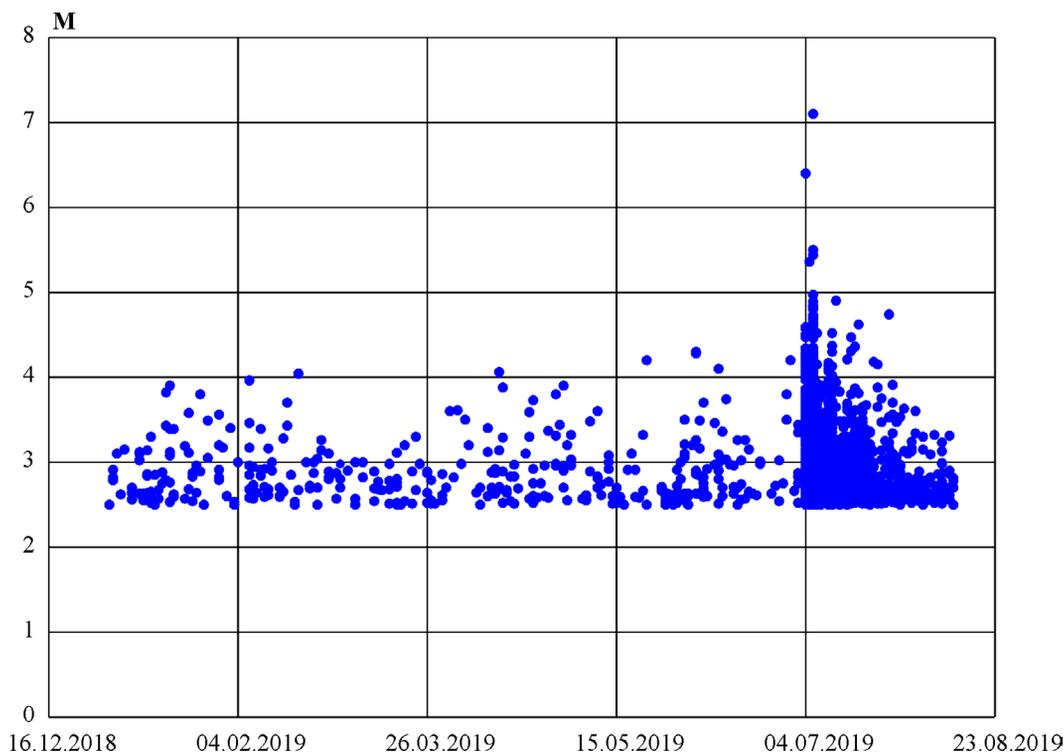


Рис. 3. График землетрясений, произошедших с января по август 2019 г. с магнитудой от 2.5.

отклонения не превышали 5–10%, что находится в пределах допустимого. Поэтому для своих исследований мы используем изображения в красной части спектра — $\Delta\lambda = 620\text{--}670$ нм (для аппаратуры MODIS).

Для исследований землетрясений, произошедших в Калифорнии, был отобран ряд безоблачных изображений с эпицентральной областью, попадающей в центр изображения для того, чтобы избежать влияния аппаратных искажений изображений MODIS.

Захват одного кадра съемочной аппаратуры MODIS (спутники Terra/Aqua) составляет 2230 км. Выбор размеров фрагментов изображений, обуславливается особенностями тематической обработки. Как правило, выбираются фрагменты размерами от 500×500 до 2000×2000 пикселей (от 125×125 до 500×500 км в масштабе поверхности Земли) (Bondur, Kuznetsova, 2005). В настоящих исследованиях использованы фрагменты изображений размером 1400×1400 пикселей (350×350 км).

Для всего исследуемого ряда космических данных проведена предварительная обработка исходных изображений, включающая в себя контроль качества, оценку метеорологической обстановки, радиометрическую и геометрическую коррекцию (Бондур, Старченков, 2001).

Изучение закономерностей изменения статистических характеристик линеаментов проведено на основе автоматизированного линеаментного анализа космических изображений, с использованием программного пакета WinLESSA (Златопольский, 2011). WinLESSA позволяет осуществить автоматический поиск линейных элементов космического изображения земной поверхности и провести анализ их ориентации и расположения. Она позволяет непосредственно анализировать изображение и в автоматизированном режиме выявлять его ориентационные характеристики (розы-диаграммы, плотности линейных элементов, протяженные линеаменты, характеристики форм роз-диаграмм, векторов и линии вытянутости и др.) (Златопольский, 2011).

Основу автоматизированного анализа составляют линейные элементы изображения (штрихи). Поиск штрихов инвариантен к изменению освещенности изображения. WinLESSA автоматически выявляет их и определяет направление (8 направлений). В полутоновом изображении штрихи — это границы однородных областей и/или линий, которые должны быть достаточно длинные и прямые (Златопольский, 2011).

При автоматическом статистическом анализе оценивается расположение штрихов каждого направления (простирается) на изучаемой площади

(в скользящем окне). Соотношение штрихов разного направления (их плотность, а точнее, их суммарная длина) отображается розой-диаграммой, которая и отражает ориентационные характеристики текстуры заданной области. По результатам измерений (в скользящем окне) строятся псевдоцветные изображения («поля»), которые показывают распределение по изображению штрихов различного направления, а также характеристики роз-диаграмм, как вытянутость, плотность, отличие от окружающих и др. (Бондур, Зверев, 2005а, б, в; Бондур и др., 2016в).

По штрихам строились протяженные сквозные линеаменты. При этом подходе штрихи объединялись в прямые линии, причем у линии могут быть разрывы. Полученные таким образом линии, возможно просматривать, задавая интересующее направление, минимальную длину и степени ее выраженности (насколько она заполнена штрихами). Найденные линии собираются в результирующую схему линеаментов, показывают их взаимное расположение, а также из каких штрихов они складываются. Меняя порог выраженности, можно изучить сквозные линеаменты разных иерархических уровней и проявленности на космическом изображении (Бондур и др., 2014, 2016в; Златопольский, 2011).

Методика прогноза землетрясений на основе автоматизированного линеаментного анализа космических изображений разработана и апробирована на примере многих сильных землетрясений в Калифорнии, России, Иране, Чили и других странах (Бондур, Зверев, 2005а, б, в; Бондур и др., 2014, 2016в).

Основными предвестниковыми статистическими показателями изменений линеаментов являлись розы-диаграммы, плотности штрихов, отношения штрихов разных направлений, региональные линеаменты, линии вытянутости роз-диаграмм штрихов (Бондур и др., 2014, 2016в).

Как показали выполненные исследования в разных сейсмических регионах, конкретные статистические показатели линеаментов, которые могут быть использованы в качестве предвестников, во многом определяются особенностями геологического строения и развития регионов. Наиболее универсальными являются розы-диаграммы, отношения штрихов разных направлений, линии вытянутости и плотности роз-диаграмм штрихов (Бондур и др., 2014, 2016в).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Эпицентры землетрясений, произошедших в Калифорнии в июле 2019 г. расположены

в мощнейшей зоне субширотного глубинного разлома (трансформного разлома), выраженной на поверхности в виде замыканий складчатых структур, морфоструктур рельефа, в коленообразных изгибах гор Сьерра-Невада, долины реки Колорадо и других элементов и форм строения земной коры и рельефа ее поверхности. Подобная пространственная приуроченность эпицентров землетрясений к пересечению крупнейших блоково-складчатых структур земной коры и мощнейшей субширотной зоны трансформного разлома определило динамику систем линеаментов в период относительного сейсмического затишья, подготовки землетрясения, в момент землетрясения и после него в стадию афтершоков. Тектонические и орографические структуры земной коры в Калифорнии (США) протягиваются с юго-востока на северо-запад (азимут простирания СЗ — 315°). Зона трансформного разлома имеет простирание запад—восток (азимут простирания З — 270°).

В связи с этим следует ожидать, что автоматизированный линеаментный анализ покажет преобладание в районе исследования простирание именно этих линеаментов. В то же время выполненные ранее исследования (Бондур, Зверев, 2005а, б, в, 2007; Bondur et al., 2005, 2017; Бондур и др., 2014, 2016в) показывают, что в период подготовки землетрясения, в момент землетрясения и после него существенную роль начинают играть поперечные линеаменты по отношению к простиранию главных тектонических и орографических структур земной коры. В нашем случае это линеаменты с простиранием с юго-запада на северо-восток (азимут простирания СВ — 45°). С учетом вышеизложенного, проанализируем результаты автоматизированного линеаментного анализа космических изображений Калифорнии. Обработаны космические изображения, полученные в период с 03.01.2019 г. по 12.08.2019 г.

Рассмотрим закономерность изменения роз-диаграмм региональных линеаментов (рис. 4). Анализ рисунка показывает, что выделяются три семейства роз-диаграмм. В первую группу близких к рисунку входят розы-диаграммы, полученные при обработке космических изображений с 03.01.2019 г. по 22.02.2019 г., во вторую — с 14.03.2019 г. по 29.05.2019 г., в третью — с 05.06.2019 г. по 12.08.2019 г.

Первая группа роз-диаграмм региональных линеаментов соответствует относительно повышенной сейсмической активности в Калифорнии с магнитудой 4. В розах нашли отражение все три основные группы линеаментов с простиранием СЗ — 315°, З — 270°, СВ — 45°. Длина лучей роз-диаграмм первой группы находится в пределах 50—130. Все три основных простирания выражены

примерно одинаково, колеблясь в небольших интервалах суммарной длины штрихов, по которым построены розы.

Вторая группа роз-диаграмм, полученная в период с 14.03.2019 г. по 29.05.2019 г., характеризуется более короткими лучами, достигающими, как правило, длины в пределах 25—90. Наблюдается некоторое преобладание направлений с азимутом СЗ — 315°, остальные проявлены примерно одинаково.

Третья группа роз-диаграмм характеризуется резким изменением рисунка. Длина лучей с азимутом простирания СЗ — 315° и СВ — 45° возрастает до 100—200. Широтные простирания (азимут простирания 30°) выражены в меньшей степени. Резкое изменение количественных характеристик роз-диаграмм линеаментов наблюдается, начиная с 05.06.2019 г., т.е. за месяц до землетрясений 04.07.2019 г. и 05.07.2019 г. Максимальная длина лучей северо-западного (продольного) и северо-восточного (поперечного) простираний выявлена 30.06.2019 г. — за несколько дней до землетрясения. Рой афтершоковых землетрясений характеризуется постепенным уменьшением суммарной длины лучей роз-диаграмм. Максимальный размер роз-диаграмм (максимальное проявление линеаментов на космических изображениях) характерен для периода начиная с 05.06.2019 г. по 18.07.2019 г.

На рис. 5 показаны кривые наиболее проявленных направлений роз-диаграмм СЗ — 315° и СВ — 45°.

Примечательным является тот факт, что на общую тенденцию изменения роз-диаграмм региональных линеаментов не влияют многочисленные землетрясения с магнитудами 4 и 5, предшествовавшие сильным землетрясениям. На этом основании можно утверждать, что наблюдающаяся закономерность изменения роз-диаграмм непосредственно связана с подготовкой сильных землетрясений и не зависит от многочисленных предшествовавших им землетрясениям, начиная с даты начала наших наблюдений 03.01.2019 г. В связи с этим, закономерное изменение роз-диаграмм региональных линеаментов, начавшееся за один месяц до июльских землетрясений, можно использовать в качестве предвестника их подготовки.

Другим статистическим показателем, закономерно изменяющимся в период подготовки июльских землетрясений в Калифорнии, является изменение суммарных длин линеаментов разных направлений.

Подобные закономерные изменения длин локальных линеаментов наблюдались на протяжении всего периода наших наблюдений, то есть начиная с 03.01.2019 г., за 6 месяцев до июльских землетрясений. Менее сильные многочисленные

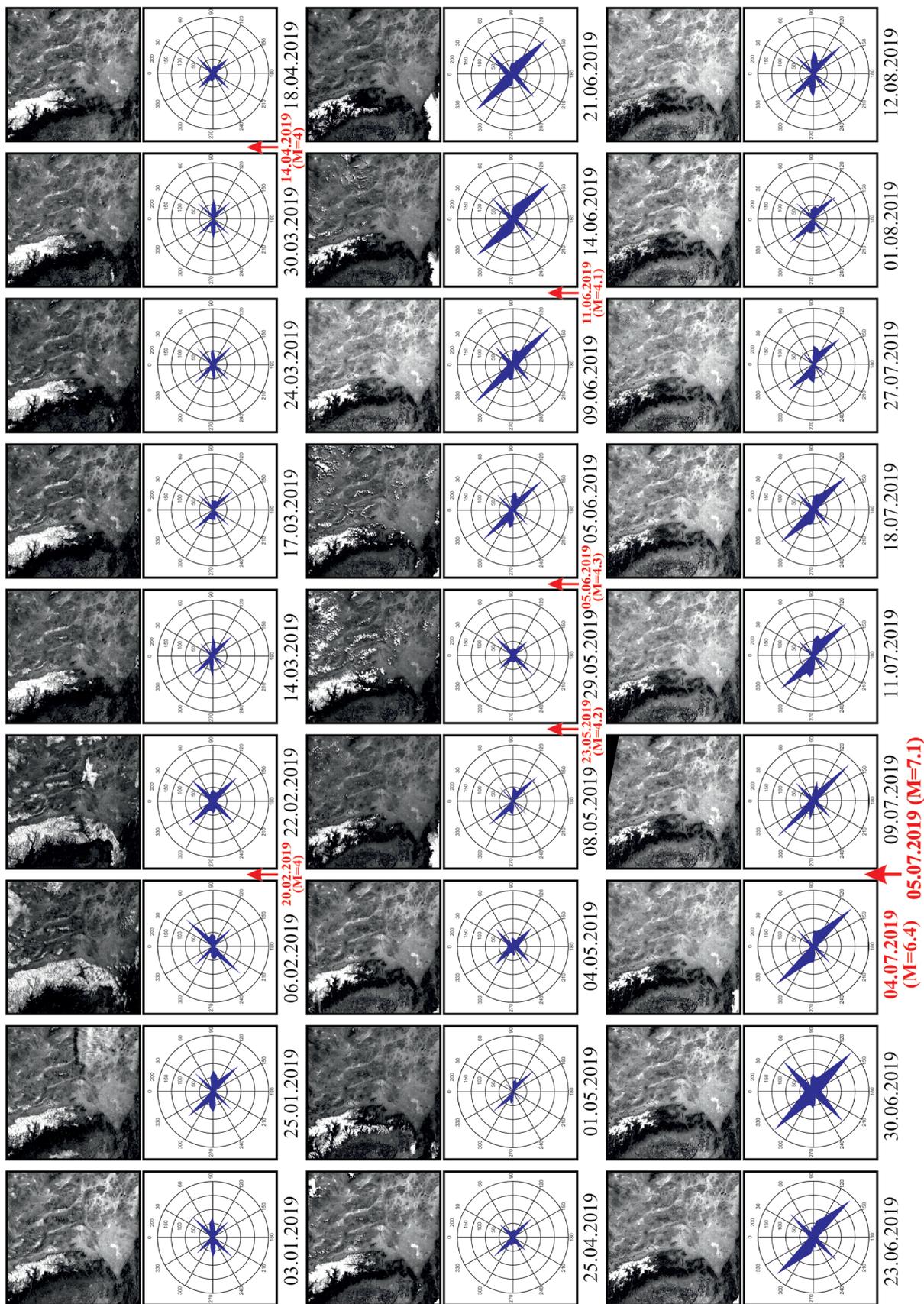


Рис. 4. Розы-диаграммы направленности региональных линейamentos.

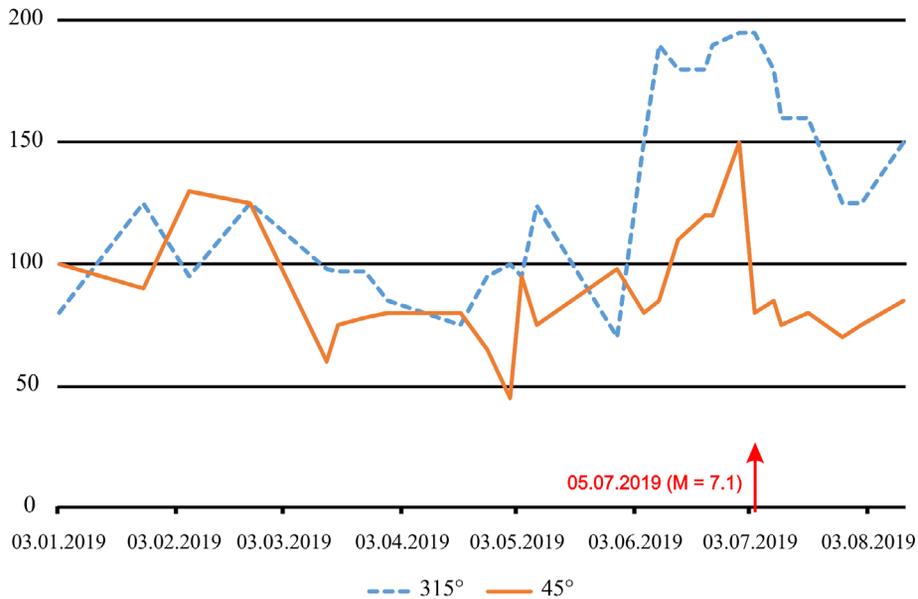


Рис. 5. Изменение длин региональных линеаментов по розам-диаграммам для направлений СЗ — 315° и СВ — 45°.

землетрясения, если и оказывали влияние на суммарную длину локальных линеаментов разных направлений, то не изменяли общую закономерную тенденцию уменьшения или увеличения длин локальных линеаментов (штрихов) при подготовке главных разрушительных толчков в июле 2019 г.

По характеру изменения суммарных длин локальных линеаментов (штрихов) образуются две группы (рис. 6). Для первой группы характерна общая тенденция увеличения суммарных (осредненных) длин штрихов. В нее входят локальные линеаменты с простираниями 0°, 22°, 315°, 338°,

то есть штрихи с простираниями, совпадающими с простиранием основных морфоструктур региона.

Для второй группы характерна общая тенденция уменьшения суммарных (осредненных) длин штрихов с простираниями 45°, 67°, 90°, 293°, то есть штрихи с простираниями отвечающими за направления субширотного трансформного разлома и поперечные к основным морфоструктурам региона.

Кривые в наглядной форме иллюстрируют характер изменения суммарной (осредненной) длины штрихов и его общую закономерную

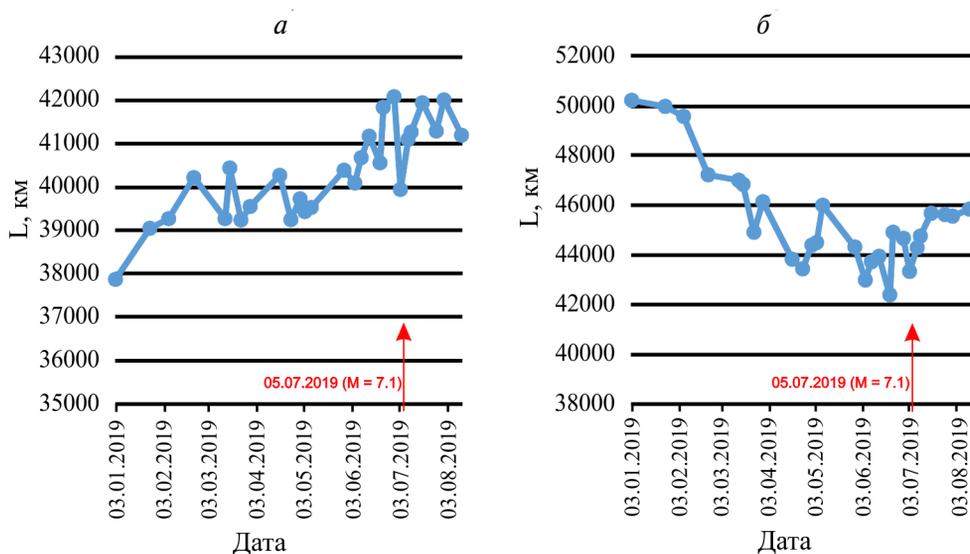


Рис. 6. Изменение суммарных длин штрихов: а — направлений 0°, 22°, 315°, 338°; б — направлений 45°, 67°, 90°, 293°.

тенденцию увеличения (0° , 22° , 315° , 338°) или уменьшения (45° , 67° , 90° , 293°) длин локальных линеаментов с начала наших наблюдений 03.01.2019 г., до землетрясений и после них. Многочисленные менее сильные землетрясения с магнитудой 5, 4 и менее не оказывали принципиального влияния на общую тенденцию изменения длин при подготовке июльских землетрясений в Калифорнии. Поэтому закономерные изменения длин локальных линеаментов разных направлений следует считать предвестниковыми для главных толчков 04.07.2019 г. и 05.07.2019 г.

Выявленная закономерность показывает, что в период подготовки землетрясений, произошедших 04.07.2019 г. и 05.07.2019 г. увеличивается проявленность (выраженность) штрихов согласных с простираем основных морфоструктур региона и уменьшается проявленность поперечных к ним штрихов и штрихов, связанных с субширотным трансформным разломом. Данное обстоятельство обусловлено увеличением проницаемости (условия растяжения) в первом случае и ее уменьшением (условия сжатия) во втором случае.

Кроме роз-диаграмм региональных линеаментов и суммарных длин локальных линеаментов разных направлений в результате автоматизированного линеаментного анализа космических изображений получены и проанализированы плотности и линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов, отношения длин линеаментов разных направлений, но по этим показателям четкой предвестниковой закономерности не выявлено, хотя слабые тенденции наблюдаются. Например, на схемах плотности роз-диаграмм локальных линеаментов, для эпицентрального фрагмента космического изображения в пределах площади 200×200 км наблюдается увеличение максимума плотности при приближении к моменту сильных землетрясений в июле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования сильных землетрясений, произошедших в Калифорнии в начале июля 2019 г., показали, что для данной территории для прогноза можно использовать такие статистические показатели изменения линеаментов, как розы-диаграммы региональных линеаментов и суммарной длины локальных линеаментов разных направлений.

При более ранних исследованиях землетрясений в качестве предвестников себя проявляли розы-диаграммы линеаментов, отношения длин линеаментов разных направлений, региональные линеаменты, плотности и линии вытянутости

роз-диаграмм локальных линеаментов (Бондур и др., 2014, 2016в).

В некоторых случаях в качестве предвестников проявлялись лишь линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов или отношения длин линеаментов разных направлений.

Таким образом, накопленный опыт использования статистических показателей, выявляемых при проведении автоматизированного линеаментного анализа космических изображений, показал, что для каждого региона характерен свой специфический набор предвестниковых показателей, зависящий от геологических особенностей его строения и развития.

Многие исследования показали эффективность прогнозирования сейсмических событий, например, по изменению ионосферы, методом сейсмической энтропии, на основе геомеханической модели и др. (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005; Бондур и др., 2007, 2010, 2016 а; Бондур, Воронова, 2012; Пулинец и др., 2010; Акопян и др., 2010; Bondur et al., 2017). Для надежного прогноза землетрясений необходимо совместное использование нескольких независимых геолого-геофизических и геодезических методов прогноза.

Автоматизированный линеаментный анализ космических изображений в этом комплексе методов будет одним из этих независимых источников информации, который обладает большой достоверностью, оперативностью и эффективностью для геодинамического мониторинга сейсмоопасных территорий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ «АЭРОКОС-МОС» в рамках Государственного задания (номер темы: ON58–2019–0030, номер государственного учета НИОКТР: АААА-А19–119081390037–2).

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. doi: 10.7868/S0002333717010021
- Аюбов Э.Н. и др. Природные угрозы // МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. 128 с.
- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.

- Бондур В.Г., Воронова О.С.* Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 году // Известия ВУЗов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2012. № 1. С. 79–85.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В.* Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016а. № 1. С.120–132. doi: 10.7868/S000233371601004X
- 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 // Доклады академии наук. 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 // Доклады академии наук. 2010. Т.430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С.* Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. doi: 10.7868/S0869565216040186
- Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. doi: 10.7868/S020596141803003X
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016б. № 6. С. 3–20. doi: 10.7868/S0205961416060105
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из космоса. 2005а. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Доклады Академии наук. 2005б. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений по результатам линеаментного анализа космических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005в. № 1. С. 76–83.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В.* Закономерность предвестниковой динамики линеаментов, регистрируемых из космоса, при землетрясениях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2014. № 1. с. 89–94.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В.* Предвестниковая изменчивость линеаментных систем, выявляемых по космическим изображениям, в период сильных землетрясений // Исследование Земли из космоса. 2016в. № 3. С. 3–12.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А.* Воздействие мезомасштабных атмосферных вихревых процессов на верхнюю атмосферу и ионосферу Земли // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А.* О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Доклады Академии наук. 2008а. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д.* Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // Исследование Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008а. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008б. № 6. С. 64–73.
- Зверев А.Т.* Инженерная геодинамика // Москва: Изд-во МИИГАиК, 2013. 324 с.
- Златопольский А.А.* Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.
- Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.
- Кузьмин Ю.О.* Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинاميке // Физика Земли. 2014. № 5. С. 51–64.
- Моги К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В.* Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003, 270 с.

Bondur V., Kuznetsova L. Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using the Method of Lineament Analysis // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 376–379.

Bondur V., Smirnov V. Monitoring of Ionosphere Variations During the Preparation and Realization of Earthquakes

Using Satellite Navigation System Data. // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 372–375.

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Joint analysis of various precursors of seismic events using remote sensing data at the example of earthquake in Italy (24.08.2016, M6.2) // 17-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June — 5 July, 2017. Albena, Bulgaria. pp. 149–162.

Detecting Lineament System Anomalies during Strong 6.4 and 7.1 Earthquakes in California from Satellite Imagery

E. V. Gaponova¹, A. T. Zverev^{1,2}, M. N. Tsidilina¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Using remote sensing data, here we study lineament system changes during preparation and process of strong 7.1 and 6.4 earthquakes in California (USA) in July 2019. A series of satellite imagery collected between January 1 and August 12, 2019, as well as the data on the seismic situation in the region have been analyzed. Precursor changes of lineament systems were revealed in rose-diagrams of regional lineaments and in total length of local lineaments of various orientations. Sharp change of quantitative characteristics of lineament rose-diagrams appeared beginning from June 5, 2019, i.e. a month before the earthquakes occurred on July 4 and 5, 2019. It has been found that maximum length of lineaments of north-western (longitudinal) and north-eastern (latitudinal) courses was on June 30, 2019, i.e. several days before seismic events.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, satellite imagery, earthquakes, precursor, lineaments

REFERENCES

Akopian S. Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A. Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. doi: 10.1134/S1069351317010025

Ayubov E.N. et al. Prirodnye ugrozy [Natural hazards] // Emercom of Russia Publ., 2016. 128 p.

Bondur V., Kuznetsova L. Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using the Method of Lineament Analysis // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 376–379.

Bondur V., Smirnov V. Monitoring of Ionosphere Variations During the Preparation and Realization of Earthquakes Using Satellite Navigation System Data. // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 372–375.

Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. doi: 10.1134/S0001433811090039

Bondur V.G. Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048. doi: 10.1134/S0001433811090040

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Analiz tekstury radio-lokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of

radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. Issue 5. P. 9–14. (In Russian).

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Distantionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi meto-dami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008b. Issue 6. P. 64–73. (In Russian).

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblou G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. doi: 10.1134/S1028334X07040381

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Connection between variations of the stress–strain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150. doi: 10.1134/S1028334X10010320

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. V. 52. № 1. P. 117–128. doi: 10.1134/S1069351316010043

Bondur V.G., Ginzburg A.S. Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // *Doklady Earth*

- Sciences. 2016. Vol. 466. № 2. P. 148–152. doi 10.1134/S1028334X16020045
- Bondur V.G., Gordo K.A.* satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 9. P. 955–965. doi: 10.1134/S0001433818090104
- Bondur V.G., Gordo K.A., Klodov V.L.* Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 9. P. 859–874. doi: 10.1134/S0001433817090055
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinyh V.P.* Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof [Monitoring and forecasting of the natural disasters]. Moscow: Nauchnyy mir, 2009. 692 p. (In Russian).
- Bondur V.G., Pulinets S.A.* Effect of Mesoscale Atmospheric Vortex Processes on the Upper Atmosphere and Ionosphere of the Earth // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. V. 48. № P. 871–878. doi: 10.1134/S0001433812090034
- Bondur V.G., Pulinets S.A., Kim G.A.* Role of variations in galactic cosmic rays in tropical cyclogenesis: evidence of Hurricane Katrina // *Doklady Earth Sciences*. 2008a. V. 422. № 7. P. 1124–1128. doi: 10.1134/S1028334X08070283
- Bondur V.G., Pulinets S.A., Uzunov D.* Vozdeystvie krupnomasshtabnykh atmosferynykh vihrevykh protsessov na ionosferu na primere uragana Katrina [Ionospheric effect of large-scale atmospheric vortex by the example of hurricane Katrina] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008b. № 6. P. 3–11 (In Russian).
- Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. P. 118–143. (In Russian).
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Joint analysis of various precursors of seismic events using remote sensing data at the example of earthquake in Italy (24.08.2016, M6.2) // 17-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June – 5 July, 2017. Albena, Bulgaria. pp. 149–162.
- Bondur V.G., Voronova O.S.* Variatsii uhodyashchego dlinnovolnovogo izlucheniya pri podgotovke i protekaniy silnykh zemletryaseniy na territorii Rossii v 2008 i 2009 godu [Variations of outgoing longwave radiation during preparation and the process of strong earthquake in Russia in 2008 and 2009] // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i Aerofotosemka*. 2012. № 1. P. 79–85 (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*, 2005b. V. 402. № 4. P. 561–567.
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Kosmicheskii metod prognoza zemletryaseniya na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov [A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005a. № 3. P. 37–52. (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmoopasnykh territoriy [Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 47–56 (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Metod prognozirovaniya zemletryaseniya po rezultatam lineamentnogo analiza kosmicheskikh izobrazheniy [A method of earthquake forecast based on the results of lineament analysis of satellite images] // *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*. 2005c. № 1. P. 76–83 (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V.* Predvestnikovaya izmenchivost lineamentnykh sistem, vyyavlyаемых po kosmicheskim izobrazheniyam, v period silnykh zemletryaseniya [Precursor variability of lineament systems detected using satellite imagery during strong earthquakes] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016b. № 3. P. 3–12. doi: 10.7868/S0205961416030027 (In Russian)
- Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V.* Zakonomernost predvestnikovoy dinamiki lineamentov, registriruemykh iz kosmosa, pri zemletryaseniya [The trend of precursor dynamics of lineaments registered from space during earthquakes] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2014. № 1. P. 89–94 (In Russian).
- Kissin I.G.* Flyuidy v zemnoy kore: geofizicheskie i tektonicheskie aspekty [Fluids in the Earth's crust: geophysical and tectonic aspects]. Moscow: Nauka, 2009. 328 p. (In Russian).
- Kuzmin Y.O.* The topical problems of identifying the results of the observations in recent geodynamics // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. V. 50. № 5. P. 641–654.
- Mogi K.* Predskazanie zemletryaseniya [Earthquake prediction]. Moscow: Mir, 1988. 382 p. (In Russian).
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V.* Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50. № 2. P. 231–242. doi: 10.1134/S0016793210020118
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseniya. Predvestniki [Earthquake physics. Precursors]. Moscow: Nauka, 2003. 270 p. (In Russian).
- Zlatopolsky A.A.* New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. Metodologiya // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011. V. 8. № 3. P. 38–46.
- Zverev A.T.* Inzhenernaya geodinamika [Engineering geodynamics] // Moscow: MIIGAIK Publ., 2013. 324 p. (In Russian).