

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ АНОМАЛИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ИЗ КОСМОСА, ПРИ ПОДГОТОВКЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КАЛИФОРНИИ

© 2020 г. В. Г. Бондур^{а, *}, М. Н. Цидилина^а, Е. В. Гапонова^а, О. С. Воронова^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”,
Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 12.07.2020 г.

Приводятся результаты использования космических данных для исследования аномалий различных геофизических полей, возникающих в процессе взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы и их применения в качестве средне- и краткосрочных предвестников сильных землетрясений, произошедших в Калифорнии 4 и 5 июля 2019 г. с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$. Предвестниковые изменения в литосфере анализировались на основе характеристик линеаментных систем, получаемых путем обработки космических изображений (спутники Terra/Aqua, прибор MODIS), а также вариаций температуры земной поверхности (спутник Aqua, прибор AIRS). Для выявления аномалий в атмосфере, возникающих при подготовке сейсмических событий, исследовались флуктуации температуры приповерхностного слоя атмосферы, температуры воздуха на высоте 1000 гПа и изменения уходящего длинноволнового излучения, регистрируемые аппаратурой AIRS спутника Aqua. Для исследования аномалий в ионосфере в процессе подготовки и протекания землетрясений регистрировались вариации электронной концентрации на высоте максимума слоя F2 по данным глобальной навигационной спутниковой системы GPS. На основе совместного анализа аномалий различных геофизических полей, выявленных при космическом мониторинге, обнаружены предвестниковые изменения, происходившие в литосфере за месяц, а в атмосфере за 3–6 дней и в ионосфере за 3–5 и 10 дней до исследуемых сильных землетрясений.

Ключевые слова: космический мониторинг, дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, землетрясения, предвестники, геофизические поля, ионосфера, линеаменты

DOI: 10.31857/S0205961420050036

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения являются наиболее опасными природными явлениями из-за своей внезапности и непредсказуемости. Они способны нанести колоссальный экономический, социальный и экологический ущерб. Согласно данным ООН, за последние 20 лет землетрясения унесли жизни более трех миллионов человек, почти миллиард испытали их тяжелые последствия. Восемь из десяти наиболее крупных по числу жителей городов планеты, таких как Токио, Мехико, Нью-Йорк, Мумбаи (Бомбей), Нью-Дели, Шанхай, Калькутта и Джакарта, расположены в сейсмоопасных зонах на разломах земной коры. Это ставит под угрозу жизнь и безопасность десятков миллионов людей (Economic..., 2018). В сейсмоопасных зонах России живут более 20 миллионов человек (Бондур и др., 2009).

В настоящее время существует несколько сотен различных по своей природе предвестников землетрясений. В то же время ни один из суще-

ствующих типов предвестников не регистрируется в 100% случаях землетрясений (Бондур и др., 2009; Киссин, 2013; Соболев, Пономарев, 2003). Сейсмическая активность Земли является сложным процессом и зависит от многих факторов. Поэтому использование многопараметрического подхода к исследованию изменений, происходящих в различных геофизических средах, позволит с большей точностью идентифицировать связь выявленных аномалий с готовящимися землетрясениями (Бондур и др., 2018; Pulinetts et al., 2015; Киссин, 2013).

Большинство предлагаемых методов прогноза землетрясений опираются на концепцию диагностирования предвестников на основе накопленного опыта предшествующих событий (Соболев, Пономарев, 2003). Неопределенность, недостаточная точность и надежность существующих методов и подходов к решению задач прогнозирования сейсмических событий, по существу, не позволяют обеспечить их эффективное применение

на практике (Бондур и др., 2009; Киссин, 2013). Поэтому актуальным является проведение исследований, направленных на поиск новых и развитие имеющихся эффективных подходов к обработке и анализу данных для выявления предвестников землетрясений, создание актуальных моделей, описывающих механизмы и предвестники землетрясений, а также разработка эффективной стратегии прогноза землетрясений, т.е. определение места, силы и времени их возникновения (Соболев, Пономарев, 2003; Бондур, и др., 2007, 2016б; Акопян и др., 2017; Molchan, Keilis-Borok, 2008).

Для выбора методов регистрации различных аномалий геофизических полей, возникающих при подготовке и протекании землетрясений, необходимо соблюдение некоторых условий, которые связаны с мозаичным характером предвестников, распространяющихся на протяженных сейсмоопасных территориях, и краткосрочностью их проявлений (Соболев, Пономарев, 2003; Bondur, Kuznetsova, 2005). Поэтому необходимо обеспечить быструю регистрацию характеристик предвестников землетрясений на больших площадях. Этим условиям в наиболее полной мере удовлетворяют современные методы дистанционного зондирования (Бондур и др., 2009; Jiao et al., 2018).

Достигнутый в настоящее время уровень развития методов и средств дистанционного зондирования, а также информационные продукты, получаемые в результате космического мониторинга, позволяют провести исследования изменений, происходящих в литосфере, атмосфере и ионосфере в период подготовки и протекания землетрясений в различных сейсмоопасных регионах. Эти изменения, регистрируемые из космоса, связаны, в том числе, с динамикой систем линеаментов (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007; Бондур и др., 2011, 2012, 2016)), вариациями параметров ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005; Смирнов и др., 2018; Пулинец и др., 2010; Липеровский и др., 1992, 2008; Bondur, Smirnov, 2005; Smirnov et al., 2005; Akhoondzadeh et al., 2019; De Santis et al., 2019; He, Neki, 2017 и др.), изменениях тепловых полей (Бондур, Воронова, 2012; Ouzounov et al., 2007, 2018; Xiong et al., 2010) перед землетрясениями.

Эффективным подходом к прогнозу землетрясений является комплексный анализ космических данных (Бондур и др., 2018; Cherepanova et al., 2018; Jiao et al., 2018) и результатов моделирования (Соболев, Пономарев, 2003; Липеровский и др., 2008; Pulinets et al., 2015), в том числе с использованием геомеханических моделей (Бондур и др., 2007, 2010, 2016б; Bondur et al., 2017) и метода сейсмической энтропии и др. (Акопян и др., 2017);

Для разработки стратегии прогноза необходимо понимание литосферно-атмосферно-ионосферных связей. До настоящего времени не существует общепринятой точки зрения относительно ме-

ханизмов возникновения аномалий в системе “литосфера–атмосфера–ионосфера” при активизации сейсмической деятельности. Существующие теории о механизмах связи в этой системе в период последней активной стадии сейсмического процесса в ряде случаев дополняют, но нередко противоречат и исключают друг друга (Бондур и др., 2007; Липеровский и др., 2008; Pulinets et al., 2015). Поэтому особую актуальность приобретают исследования, в ходе которых осуществляется совместный анализ значимых параметров различных геофизических сред, позволяющий уточнять связи между ними при подготовке и протекании землетрясений, а также выявлять предвестники различной физической природы, регистрируемые наземными и космическими средствами (Бондур и др., 2018; Pulinets et al., 2006, 2015; Cherepanova et al., 2018).

В настоящей работе представлены результаты исследований динамики систем линеаментов, изменений тепловых полей, вариаций параметров ионосферы, зарегистрированных из космоса, а также результаты совместного анализа выявленных аномалий, возникающих в процессе взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы при подготовке и протекании серии землетрясений, произошедших в восточной Калифорнии в июле 2019 г. Одним из них является крупнейшее за последнее время в этом регионе землетрясение, произошедшее вблизи г. Риджквест 5 июля 2019 г. с магнитудой $M = 7.1$ (Бондур и др., 2020).

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Южная Калифорния является одним из наиболее сейсмоопасных районов Земного шара, для которого организовано получение наиболее полной информации, позволяющей анализировать аномальные вариации различных геофизических полей, в том числе регистрируемых из космоса. Поэтому эта территория является своеобразным международным полигоном для исследования землетрясений. Кроме того, землетрясения с $M \geq 7$ в этом регионе происходят достаточно редко, поэтому представляется интересным проанализировать динамику линеаментных систем, изменения тепловых полей и параметров ионосферы при подготовке и протекании землетрясения с $M = 7.1$, которое произошло 5 июля 2019 г.

В июле 2019 г. в Восточной Калифорнии произошла серия землетрясений с магнитудами $2.5 \leq M \leq 7.1$. Толчки с наибольшими магнитудами были зарегистрированы в 09:33:49 (LT) 4 июля 2019 г. ($M = 6.4$, координаты: 35.705° N , 117.504° W) и в 19:19:53 (LT) 05.07.2019 г. ($M = 7.1$, координаты: 35.770° N , 117.599° W) (Бондур и др., 2020). Эпицентры практически всех этих землетрясений были сосредоточены в Восточной Калифорнии на разломе

Литтл-Лейк в 150 км к северо-востоку от пересечения разломов Сан-Андреас и Горлок (см. рис. 1, а). Разлом Литтл-Лейк является частью сети разломов, которые составляют Восточно-Калифорнийскую зону сдвига (см. рис. 1, б). За последние несколько десятилетий геодезические наблюдения показывали, что на эту зону шириной ~100–150 км приходится $\frac{1}{4}$ доля от общего относительного движения ($\sim 12 \pm 2$ мм/год) между Тихоокеанской и Североамериканской плитами (Bennett et al., 2003). Вместе с правосторонним разломом Оуэнс Вэлли на севере, правосторонний разлом Литтл-Лейк образует протяженную систему через Косо Рендж, что приводит к сфокусированному расширению, утончению земной коры, геотермальной активности и обширной мелкофокусной сейсмичности (Amos et al., 2013).

Необходимо отметить, что в этом районе Калифорнии сильное землетрясение с магнитудой больше 7 в последний раз было зарегистрировано 16 октября 1999 г. ($M = 7.1$). На расстоянии около 400 км к югу от землетрясений 2019 г. было зарегистрировано землетрясение 4 апреля 2010 г. с $M = 7.2$ (Бондур и др., 2016а). При этом в радиусе 50 км от землетрясений, состоявшихся в 2019 г., сильное землетрясение, начиная с 1900 г., последний раз было 15 марта 1946 г. ($M = 6.3$) (см. рис. 1, а).

Характерной особенностью сейсмического режима исследуемого региона с начала 2019 г., являлось то, что до 4 июля 2019 г. землетрясений с магнитудами от 2.5 до 3.9 было немного (с 1 апреля до 4 июля 2019 г. – 140) и распределение этих сейсмических событий по датам было достаточно равномерным (см. рис. 1, в). Следует отметить, что в исследуемом районе до 3 июля 2019 г. не было зарегистрировано ни одного сейсмического толчка с магнитудой более 4.3 (см. рис. 1, в).

Начиная с 4 июля 2019 г., сила и частота землетрясений резко возросла, и с этого дня по 26 июля 2019 г. в исследуемом районе Калифорнии произошло около 1900 землетрясений с магнитудами от 2.5 до 7.1, в том числе пять землетрясений с $M \geq 5$ и два сильных землетрясения с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$ (см. рис. 1, в).

Большая часть землетрясений произошла в радиусе 50 км от главного толчка, произошедшего 5 июля 2019 г. с магнитудой $M = 7.1$ (см. рис. 1, б). Это землетрясение было зарегистрировано приблизительно через 34 ч после землетрясения магнитудой $M = 6.4$, состоявшегося в 11 км к северо-западу от него. Землетрясению, произошедшему 4 июля 2019 г. ($M = 6.4$), предшествовал форшок с магнитудой $M = 4.0$ (за 30 мин до исследуемого сейсмического события). После землетрясения, состоявшегося 4 июля 2019 г. ($M = 6.4$), произошла мощная последовательность афтершоков (266 толчков) с магнитудами $2.5 \leq M \leq 5.5$, вплоть до исследуемого сильного землетрясения с маг-

нитудой $M = 7.1$. Непосредственно 4 июля 2019 г. было зарегистрировано 153 землетрясения, 5 июля – 102, 6 июля – 684, 7 июля – 175, 8 июля – 103, 9 июля – 72, 10 июля – 83, 11 июля – 82 землетрясения. Далее количество землетрясений, как видно из рис. 1, в, пошло на уменьшение и не превышало 35 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа аномалий геофизических полей, связанных с подготовкой и протеканием землетрясений в Калифорнии (США), состоявшихся в июле 2019 г., исследовалась динамика систем линеаментов, изменения температуры (поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и воздуха на высоте 1000 гПа), вариации уходящего длинноволнового излучения, а также аномалии параметров ионосферы.

Исследования систем линеаментов

Линеаменты, выявляемые при автоматизированной обработке космических изображений, имеют различную физическую природу (Бондур, Зверев, 2005а, б; 2007). Одни из них, наиболее стабильные (консервативные), связаны с линейными объектами (элементами) и спрямленными границами частей ландшафтов, различающихся по отражательным спектральным характеристикам (Бондур, Зверев, 2007). Более динамичные линеаменты отражают чередование зон сжатия и растяжения земной коры (Кац и др., 1986; Бондур и др., 2016в). Их проявленность на космических изображениях (особенно в случае однородных ландшафтов) прямо зависит от влияния поля напряжения на геологическую среду (Бондур, Зверев, 2005а, б; 2007).

Наиболее благоприятные условия для проявления линеаментов (зон, полос) возникают в случае интенсивного теплопереноса в зонах растяжения (зонах трещиноватости и разрывных нарушений). Теплоперенос из глубин к поверхности не остается постоянным, а становится наиболее интенсивным в моменты возбуждения тектонической (сеймотектонической) активности недр (Бондур, Зверев, 2007). Основываясь на данной особенности, представляется возможность установления закономерных связей интенсивности теплопереноса и обусловленной ею степенью проявленности линеаментов с сейсмичностью (Кац и др., 1986; Бондур, Зверев, 2005а, б; Бондур и др., 2012, 2016в).

Исследования линеаментных систем по космическим изображениям, полученным на период подготовки, протекания и завершения землетрясений, произошедших в разных регионах мира, позволил выявить закономерный характер их вы-

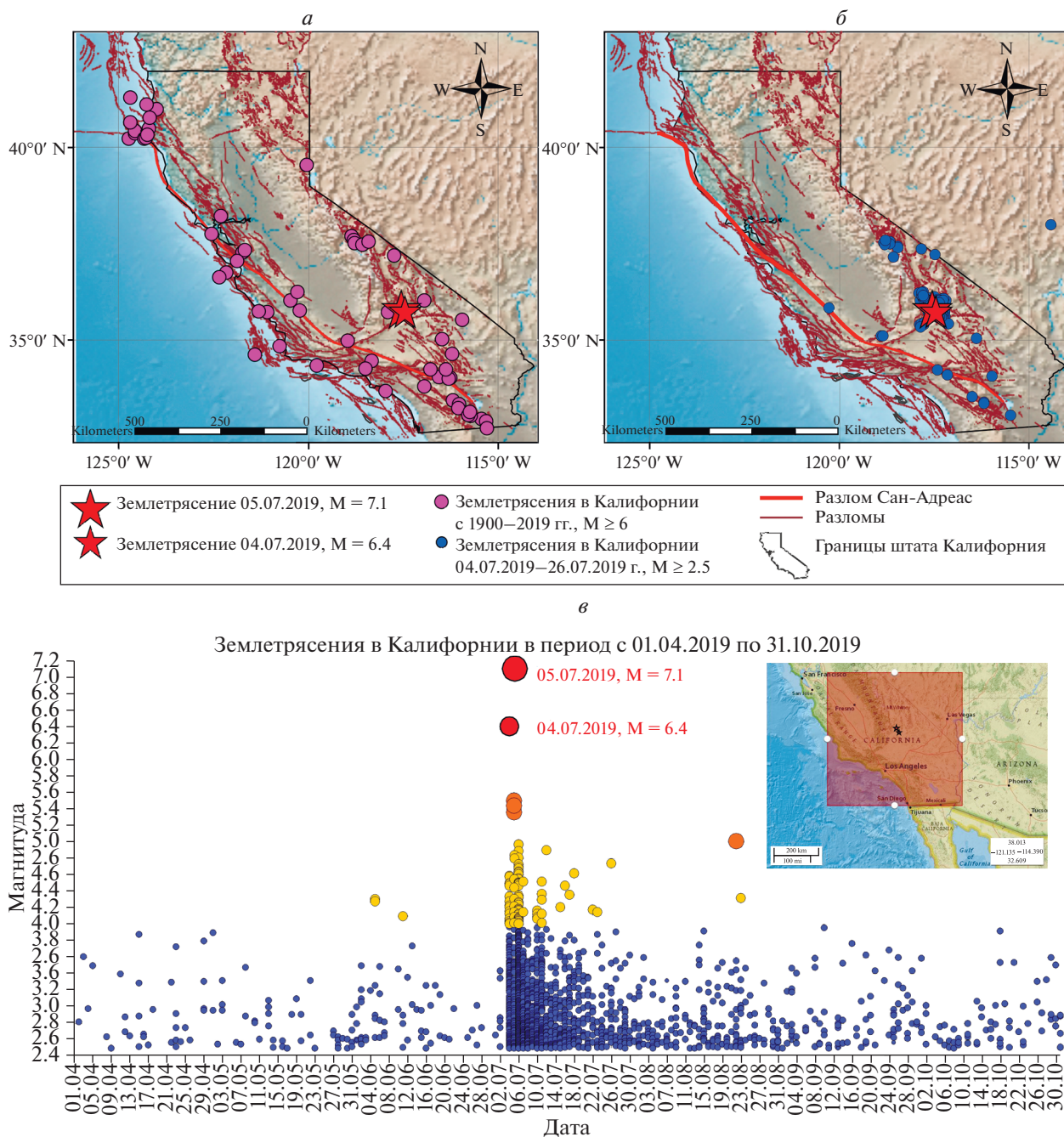


Рис. 1. Эпицентры землетрясений в Калифорнии (США) с $M \geq 2.5$ в период с 4 июля 2019 г. по 26 июля 2019 г. (а), с $M \geq 6$ в период с 1900 по 2019 г. (б), распределение землетрясений с $M \geq 2.5$ в период с 1 апреля 2019 г. по 31 октября 2019 г. (в).

раженности. За 2–3 мес. до землетрясения количество линейментов начинает постепенно увеличиваться, достигая максимума в среднем за 20 дней до землетрясения, и уменьшаться после землетрясения, снижаясь через 2–3 мес. до исходного (первоначального) количества (Бондур, Зверев, 2005а, б); Бондур и др., 2012, 2016в; Гапонова и др., 2019; Bondur, Kuznetsova, 2005).

При проведении настоящих исследований был отобран ряд разновременных безоблачных космических изображений с пространственным разрешением 250 м, полученных аппаратурой MODIS (спутник Terra/Aqua) в период времени с 3 января по 12 августа 2019 года (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>). Были использованы фрагменты космических изображений размером 1400×1400 пиксе-

лей (350 × 350 км). Перед началом тематической обработки был осуществлен контроль качества космических изображений, а также проведены их радиометрическая и геометрическая коррекции. С использованием программного пакета WinLESSA (Златопольский, 2011) проводился автоматизированный линеаментный анализ и выявлялись линейные элементы космических изображений земной поверхности.

При автоматическом статистическом анализе оценивалось расположение штрихов (локальных линеаментов) по 8-ми направлениям (простирающимся) на изучаемой площади (в скользящем окне). Далее строились статистические характеристики линеаментов (схемы региональных линеаментов и суммарные длины локальных линеаментов), которые использовались в качестве предвестников землетрясений. Соотношение региональных линеаментов разного направления (их плотность, а точнее, их суммарная длина) отображается розами-диаграммами, которые отражают ориентационные характеристики текстуры заданной области (Бондур и др., 2016в).

Применение тех или иных показателей в качестве предвестников сейсмических событий во многом определяется особенностями геологического строения. Наиболее универсальными являются розы-диаграммы линеаментов, отношения штрихов разных направлений, линии вытянутости и плотности роз-диаграмм штрихов (Бондур, Зверев, 2005а, в; Бондур, Зверев и др., 2012, 2016в).

Особенности исследования тепловых полей

С учетом физических особенностей генерации тепловых аномалий в период подготовки и протекания сейсмических событий, процесс трансформации тепла начинается с поверхности Земли и продолжается на различных уровнях атмосферы до верхней границы облаков (Ouzounov et al., 2007; Бондур, Воронова, 2012).

Повышение температуры поверхности суши и приповерхностного слоя воздуха не всегда можно зарегистрировать методами дистанционного зондирования, так как исследуемые области иногда оказываются покрытыми облаками, не позволяющими проводить измерения с орбиты. Именно поэтому для выявления тепловых аномалий используются измерения уходящего длинноволнового излучения (OLR – Outgoing Longwave Radiation). Такие измерения проводятся на высоте верхней границы облаков – 10–15 км в окне прозрачности 8–12 мкм (диапазон инфракрасного излучения, практически не поглощаемого атмосферными газами) (Ouzounov et al., 2007; Бондур, Воронова, 2012).

Следует отметить, что расположение тепловых аномалий не обязательно должно совпадать с по-

ложениями эпицентров будущих сейсмических событий, поскольку в процессе подготовки землетрясений активируются достаточно большие области (Бондур, Воронова, 2012). Для сильных землетрясений область подготовки может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч километров (Ouzounov et al., 2007, 2018; Xiong et al., 2010).

В настоящей работе с помощью сервиса Giovanni (Acker, 2007) осуществлялся предварительный анализ вариаций тепловых полей. Использовались данные прибора AIRS спутника Aqua (тематические продукты 3-го уровня обработки с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$) (Hearty et al., 2013). Значения каждого из тепловых полей: SurfSkinTemp (температура поверхности), SurfAirTemp (температура приповерхностного слоя атмосферы), AirTemperature (температура воздуха на высоте 1000 гПа (высота около 100 м над уровнем моря)), OLR (уходящее длинноволновое излучение), усреднялись по площади в пределах выбранной территории исследования и представлялись в виде графиков для выявления наиболее информативного параметра изменений тепловых полей в процессе подготовки сейсмических событий.

После проведения предварительного анализа изменений тепловых полей в процессе подготовки и протекания землетрясений на территории Калифорнии выбран наиболее показательный параметр (OLR), позволяющий выявить аномальные процессы, происходящие в атмосфере перед сильным сейсмическим событием. Для анализа динамики OLR были обработаны спутниковые данные, полученные с помощью прибора AIRS в период с 15 июня по 12 июля 2019 года, а также данные предшествующих лет (с 2003 по 2018 год) для этого временного интервала.

Обработка информации осуществлялась с использованием специального программного модуля, выполняющего предварительную обработку данных и нормализацию с помощью стандартного отклонения. В процессе предварительной обработки проводилось разархивирование данных формата hdf, использовавшегося для хранения большого объема цифровой информации, а также выполнялась проверка целостности данных и устранялись ошибочные значения. Значения –9999 (если целое) и –9999.0 (если с плавающей точкой) или число 0 указывали на недостающие данные или непригодные для исследований (Hearty et al., 2013).

Нормализация данных с помощью стандартного отклонения заключалась в определении разностей между текущими и средними арифметическими значениями OLR, а также делении их на стандартные отклонения. Это позволяло преобразовать диапазон значений числового признака в независимый от единиц измерений, и появля-

лась возможность сопоставление полученных результатов с другими исследуемыми параметрами.

Особенности исследования аномалий ионосферы

Проведенные ранее исследования вариаций параметров ионосферы в период сейсмической активности позволили выделить основные характеристики ионосферных предвестников землетрясений (Бондур, Смирнов, 2005; Бондур и др., 2007; Пулинец и др., 2008; Липеровский и др., 1992; Смирнов и др., 2018; Bondur, Smirnov, 2005; Smirnov et al., 2005; Pulinets, Boyarchuk, 2004), которые представляют собой:

- вариации плотности ионосферной плазмы (отклонения от невозмущенного значения), знак вариаций может быть как положительным, так и отрицательным;

- непосредственно над эпицентром будущего землетрясения происходит нарушение пространственно-временного хода в распределении электронной плотности ионосферы;

- длительность ионосферных вариаций составляет от несколько часов до нескольких суток и зависит от сейсмической активности в данном регионе;

- в среднем сейсмоионосферные вариации имеют ту же амплитуду, что и ежедневная изменчивость ионосферы (10–15%), но могут достигать и более высоких значений;

- знак и форма сейсмоионосферных вариаций зависят от местного времени;

- размер модифицированной области ионосферы на высоте максимума слоя F2 зависит от магнитуды землетрясения и направления разлома;

- положение максимума модифицированной области в ионосфере может не совпадать с вертикальной проекцией эпицентра будущего землетрясения.

При использовании данных спутниковых навигационных систем для мониторинга вариаций ионосферной плазмы проводились расчеты для сигналов, полученных для всех космических аппаратов, находящихся в зоне видимости навигационного приемника, одновременно по нескольким навигационным станциям наблюдения (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005; Смирнов и др., 2018). Для выделения возможных ионосферных предвестников необходимо проводить контроль пространственно-временного хода параметров ионосферы. Сопоставление данных, полученных с одних и тех же спутников, но с разных навигационных станций, позволяет оценить ионосферные возмущения, наблюдаемые в исследуемом регионе (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005).

Исследование параметров ионосферы проводилось по данным глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS. Исходные данные по сигналам с различных навигационных спутников для нескольких наземных станций были получены с сайта <http://sopac-csrg.ucsd.edu/> за период времени с 24 июня 2019 г. по 9 июля 2019 г. Такой период был выбран на основании проведенных ранее исследований, из которых следует, что ионосферные предвестники землетрясений представляют собой локальные вариации плотности ионосферной плазмы, наблюдаемые, как правило, за 1–7 сут до землетрясения, причем они могут быть как положительными, так и отрицательными (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005; Smirnov et al., 2005). При приближении к моменту землетрясения аномалия может изменить знак на противоположный. Следует отметить, что в ряде исследований, например, (De Santis et al., 2019; Akhoondzadeh et al., 2019; Marchetti, Akhoondzadeh, 2018) описаны аномалии, зарегистрированные за 8–11, 20, 80 и 100 дней до сейсмического события, а также за несколько минут до землетрясения (He, Neki, 2017; Смирнов и др., 2018).

Выбор наземных станций ГНСС GPS осуществлялся с учетом того, что радиус зоны подготовки землетрясения с магнитудой $M = 7.1$ мог составлять величину порядка 1200 км (Dobrovolsky et al., 1979). В связи с этим для исследования было выбрано 7 наземных станций, расположенных на расстоянии от 14.7 до 2260.0 км от эпицентра землетрясения (см. табл. 1, рис. 6, б).

Для обработки GPS-данных использовалась методика, приведенная в работах (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005). Методика основана на восстановлении параметров ионосферы путем реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли, в котором используются измерения параметров радиосигналов существующих навигационных систем. В этом методе практически реализуется алгоритм решения обратных задач рефракции радиоволн, неустойчивых по своей природе и требующих применения специальных математических методов, позволяющих учитывать дополнительную информацию о решаемой задаче (Андрианов, Смирнов, 1993; Бондур, Смирнов, 2005). Эта методика позволяла оперативно определять распределение электронной концентрации ионосферы практически в любом месте Земного шара по наблюдениям с нескольких наземных пунктов, что весьма важно для контроля удаленных и труднодоступных сейсмоопасных регионов. Тем самым она давала возможность исследовать динамические процессы, происходящие в ионосфере, практически в реальном масштабе времени (Бондур, Смирнов, 2005; Bondur, Smirnov, 2005; Smirnov et al., 2005).

В результате обработки навигационных данных были получены значения электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы (NeF2) вдоль траекторий подионосферных точек с дискретностью 30 с для высот от 80 до 1000 км по данным со следующих наземных станций ГНСС GPS: cccc, p573, p081, p020, p039, p777, prds.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты исследований изменений систем линеаментов

На рис. 2 приведены изменения роз-диаграмм региональных линеаментов, построенных по фрагментам космических изображений участка исследуемого сейсмоопасного района, размером 350×350 км, в период времени с 3 января по 12 августа 2019 года. Анализ этого рисунка показывает, что выделяются три группы роз-диаграмм.

В первую группу входят розы-диаграммы региональных линеаментов, построенных при обработке космических изображений, полученных с 3 января 2019 г. по 22 февраля 2019 г., которые соответствуют незначительно повышенной сейсмической активности в Калифорнии с толчками магнитудой до $M = 4$ (см. рис. 1, в). В розах-диаграммах этой группы нашли отражение три основных типа направлений линеаментов: северо-западное (СЗ) – 315° ; западное (З) – 270° ; северо-восточное (СВ) – 45° (см. рис. 2). Длина лучей роз-диаграмм первой группы изменяется в пределах 50–130 единиц. Все три основных простирания линеаментов выражены примерно одинаково, колеблясь в небольших интервалах суммарной длины региональных линеаментов, по которым построены розы- диаграммы.

Вторая группа роз-диаграмм, сформированная за период времени с 14 марта по 29 мая 2019 г., в котором наблюдалась пониженная сейсмическая активность (см. рис. 1, в), характеризовалась более короткими лучами, достигающими, как правило, длины в пределах 25–90 единиц. Для этой группы роз-диаграмм наблюдалось некоторое преобладание лучей с направлениями СЗ – 315° (см. рис. 2).

Третья группа роз-диаграмм получена при обработке космических изображений, полученных за период времени с 5 июня 2019 г. по 12 августа 2019 г. Она характеризуется резким изменением характера линеаментов (см. рис. 2). Длина лучей с азимутом простирания СЗ – 315° и СВ – 45° возрастает до 100–200 единиц. Широтные простирания (азимут 30°) выражены в меньшей степени. Резкое изменение количественных характеристик роз-диаграмм линеаментов наблюдалось, начиная с 5 июня 2019 г. (см. рис. 2), т.е. за месяц

до землетрясений, состоявшихся 4 июля 2019 г. и 5 июля 2019 г. Максимальная длина лучей северо-западного (продольного) и северо-восточного (поперечного) простираний была выявлена 30.06.2019 г. – за 4–5 дней до этих землетрясений.

Анализ рис. 2 показал, что рой слабых землетрясений с магнитудами около 4 и менее сопровождался постепенным уменьшением суммарной длины лучей роз-диаграмм. Максимальный размер роз-диаграмм (максимальное проявление линеаментов на космических изображениях) был характерен для периода времени с 5 июня 2019 г. по 18 июля 2019 г., когда была зафиксирована наиболее интенсивная сейсмическая активность. При этом многочисленные землетрясения с магнитудами около 4 и менее, предшествовавшие сильным землетрясениям, незначительно влияют на общую тенденцию изменения роз-диаграмм региональных линеаментов.

На этом основании можно утверждать, что наблюдаемая закономерность существенного изменения характера роз-диаграмм непосредственно связана с подготовкой сильных землетрясений (магнитуды более 6) и не зависит от многочисленных предшествовавших им слабых землетрясений, начиная с даты начала наших наблюдений (3 января 2019 г.). В связи с этим закономерное существенное изменение роз-диаграмм региональных линеаментов, начавшееся за один месяц до июльских сейсмических событий (магнитуды $M = 6.4$ и $M = 7.1$), можно использовать в качестве предвестника подготовки сильных землетрясений.

Результаты исследований тепловых аномалий

Для анализа динамики изменения тепловых полей были обработаны космические данные, полученные прибором AIRS (спутник Aqua), в период подготовки и протекания сильных землетрясений, произошедших на территории Калифорнии 4 и 5 июля 2019 года (магнитуды $M = 6.4$ и $M = 7.1$).

По данным сервиса Giovanni (Acker, 2007) построены графики изменения тепловых полей: SurfSkinTemp (температура поверхности), SurfAirTemp (температура приповерхностного слоя атмосферы), AirTemperature (температура воздуха на высоте 1000 гПа (высота около 100 м над уровнем моря)), OLR (уходящее длинноволновое излучение), которые представлены на рис. 3. Значения каждого из тепловых полей, полученные в ночное время суток, усреднены по площади в пределах выбранной территории исследования (124.5 W, 33.5 N; 107.5 W, 42.5 N). Временной период исследований составил с 15 июня по 12 июля 2019 года.

Из результатов предварительного анализа данных, приведенных на рис. 3, следует, что в перио-

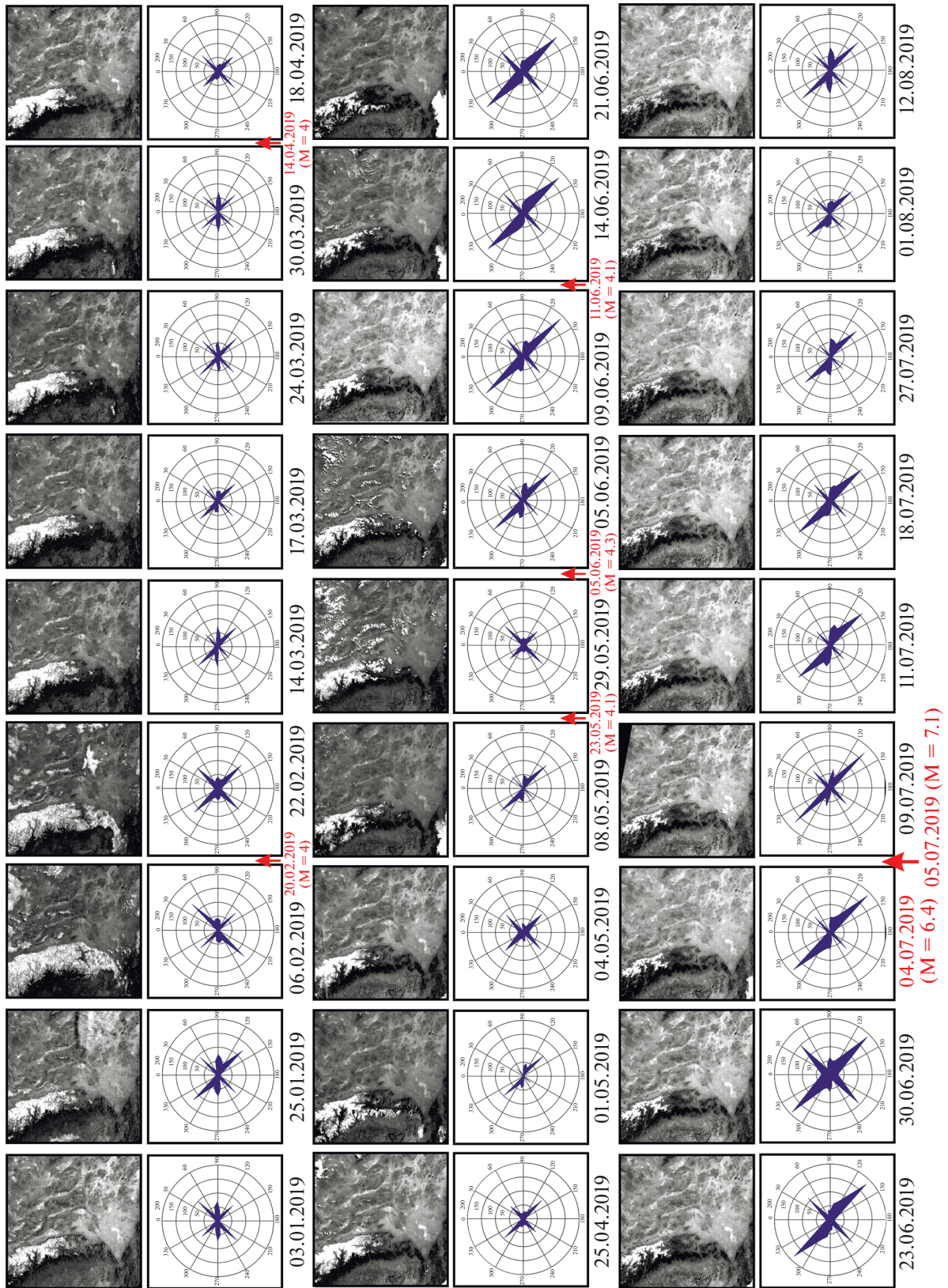


Рис. 2. Розы-диаграммы направленности региональных линейментов.

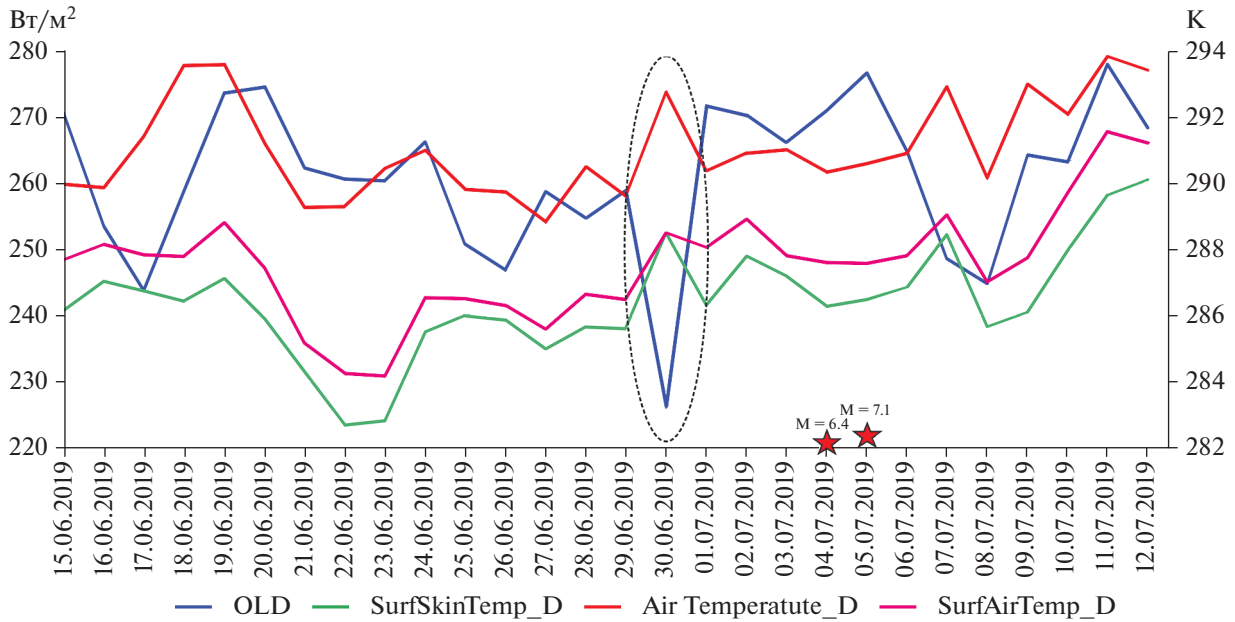


Рис. 3. Графики изменения значений, усредненных по площади в ночное время суток. OLR (уходящее длинноволновое излучение), SurfSkinTemp (температура поверхности), AirTemperature (температура воздуха на высоте 1000 гПа), SurfAirTemp (температура приповерхностного слоя атмосферы) в период с 15 июня по 12 июля 2019 г.

ды времени с 26 на 27 и с 28 на 29 июня 2019 года начали проявляться противофазные колебания значений OLR и температур (поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и воздуха на высоте 1000 гПа). При увеличении значений OLR происходило снижение значений этих температур и наоборот понижение OLR сопровождалось повышением температур. В период с 29 июня по 1 июля 2019 года зафиксирован сначала рост температур на 3 К и существенное падение значений OLR на 33 Вт/м², а затем наоборот резкий рост OLR на 46 Вт/м² и понижение температур на 3К. Максимальные значения OLR, усредненные по площади на данной территории, были зафиксированы в день землетрясения 5 июля 2019 года и составили 277 Вт/м² (см. рис. 3).

Из анализа рис. 3 можно сделать вывод о том, что наиболее выраженные изменения в атмосфере перед землетрясением выявлены по данным OLR, поэтому данный параметр выбран для дальнейшего анализа.

Для дневных/ночных значений OLR проводилась нормализация данных, полученных за период времени с 15 июня по 12 июля 2019 года, с использованием данных предшествующих лет (с 2003 по 2018 год) для этого временного интервала. Анализ полученных нормализованных данных позволил выявить аномалии, представляющие собой максимальное изменение дневных/ночных колебаний по сравнению с текущим

состоянием. Карта перемещения аномалий OLR представлена на рис. 4.

Из анализа рис. 4 следует, что 28 и 29 июня 2019 года дневные аномалии OLR перемещались в южном направлении, а 2 и 3 июля 2019 г. эти аномалии перемещались в северном направлении. Расположение аномалий, выявленных по нормализованным данным в ночное время суток, а также их интенсивность, представлены на рис. 5.

Из анализа рис. 5 следует, что в ночное время суток 1 и 2 июля 2019 года наблюдались аномалии наибольшей интенсивности, нормализованные значения, которых составляли $N_i = 0.75$ и $N_i = 0.8$ соответственно. Они располагались в северо-восточном направлении от эпицентра землетрясения. В день главного землетрясения (5 июля 2019 г.) по дневным и ночным данным зафиксированы максимальные значения нормализованного индекса уходящего длинноволнового излучения $N_i = 1$.

После сильных землетрясений, произошедших 4 и 5 июля 2019 года, аномалии OLR продолжали наблюдаться в эпицентральной зоне, что связано, вероятно, с активной афтершоковой ситуацией.

По результатам нормализации данных прибора AIRS, в период подготовки и протекания землетрясений, произошедших 4 и 5 июля 2019 года, выявлено перемещение аномалий OLR в пределах эпицентральной области землетрясений, в ночное время суток в южном направлении по сравнению с данными, полученными в дневное время.

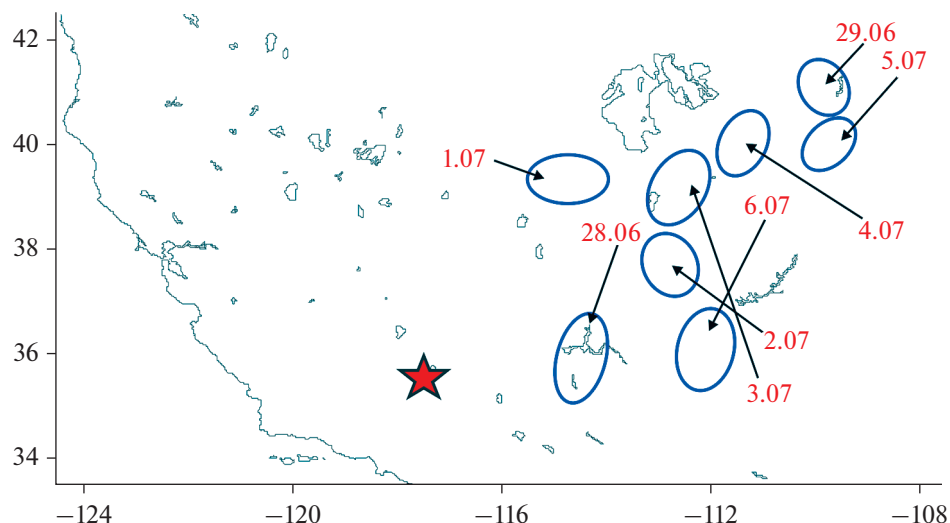


Рис. 4. Карта перемещений аномалий уходящего длинноволнового излучения в период подготовки серии землетрясений в Калифорнии в июле 2019 г. Красным цветом обозначены даты появления аномалий в дневное время суток, стрелка указывает направление перемещения аномалий и регистрация их в ночное время (эллипсы).

Результаты исследований ионосферных аномалий

Исследование вариаций ионосферной плазмы проводилось по данным наземных станций ГНСС GPS cccc, p573, p081, p020, p039, p777 и prds, находящихся на различных расстояниях от эпицентров землетрясений (см. табл. 1). На основании результатов проведенной обработки были получены значения электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы для 14 спутников, которые в разное время суток были в зоне видимости наземной станции p573, находящейся на расстоянии около 29 км к северо-западу от эпицентров землетрясений. Траектории подионосферных точек этих спутников показаны на рис. 6, а.

В табл. 2 приведены величины падения электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы в процентах относительно значений

для предыдущего дня. Если уменьшение электронной концентрации наблюдалось в течение нескольких дней подряд, то эти значения рассчитывались относительно дня, предшествовавшего первому дню падения. Анализ полученных данных позволил выявить дни, в которые наблюдалось падение электронной концентрации ионосферы в период с 24 июня по 9 июля 2019 года.

Из анализа табл. 2 следует, что по данным спутников № 2, 6, 12 (время пролета от 9 до 14 ч по местному времени) было зарегистрировано падение электронной концентрации на 5–14% в течение трех дней с 29 июня по 1 июля 2019 г. (см. табл. 2), т.е. за 3–4 дня до землетрясений, произошедших 4 и 5 июля 2019 г. Траектории спутников № 2 и 6 проходили в направлении юг–север–северо-восток, траектория спутника № 12 – в направлении юг–север–запад (см. рис. 6, а).

Таблица 1. Станции ГНСС GPS для анализа вариаций параметров ионосферы при подготовке землетрясений в Калифорнии в июле 2019 г.

№ пп	Название станции	Координаты станции		Расстояние от эпицентра до станции, км	Направление расположения станции относительно эпицентра
		Широта	Долгота		
1	cccc	35.57° N	117.67° W	14.70	Юг
2	p573	36.093° N	118.26° W	29.10	Северо-запад
3	p081	39.067° N	113.871° W	492.00	Северо-восток
4	p020	47.00° N	118.57° W	1250.00	Север
5	p039	36.45° N	103.15° W	1300.00	Восток
6	prds	50.87° N	114.29° W	1700.00	Северо-восток
7	p777	35.70° N	92.55° W	2260.00	Восток

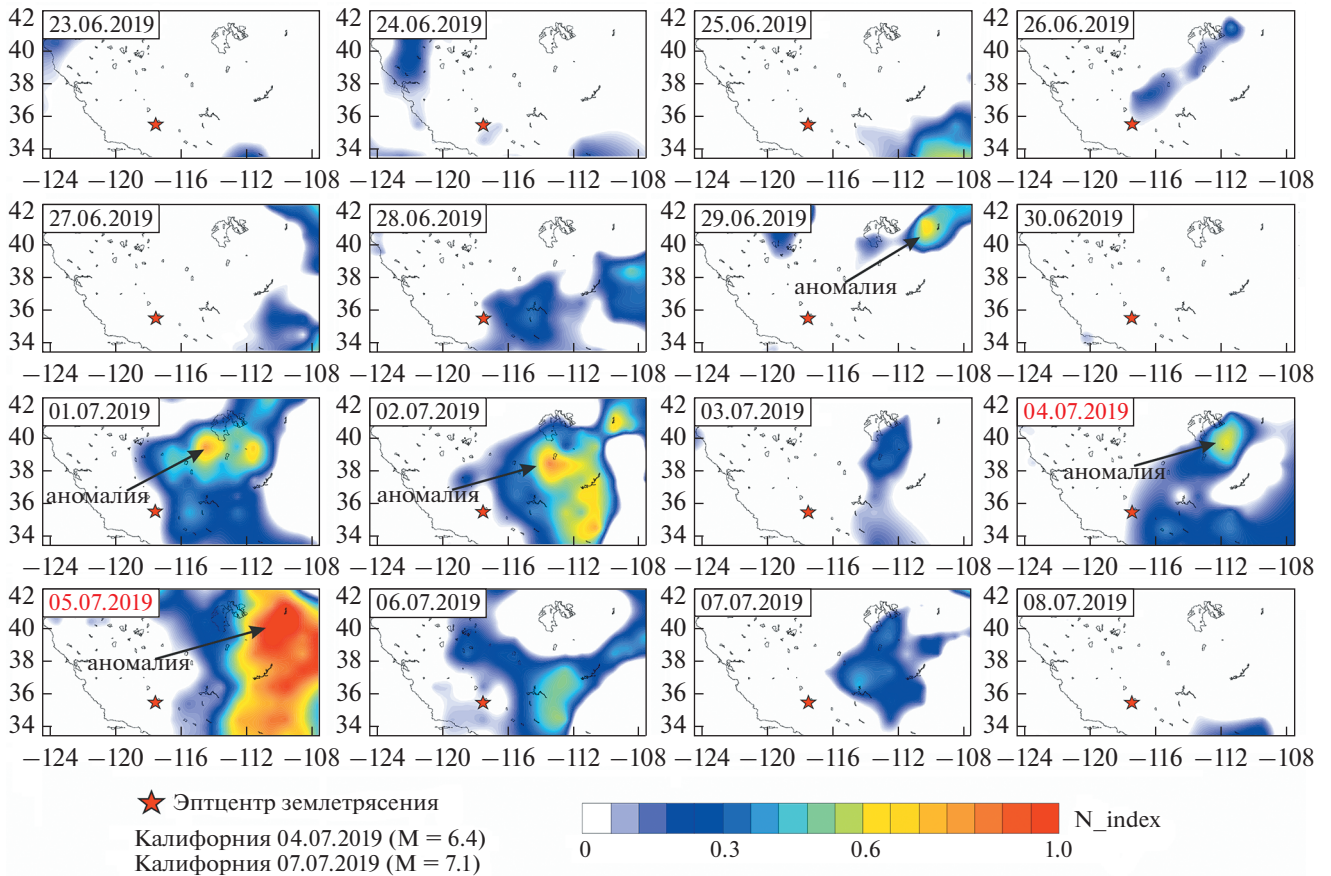


Рис. 5. Вариации уходящего длинноволнового излучения (ночные данные) в процессе подготовки и протекания землетрясений в Калифорнии 4 и 5 июля 2019 года магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$.

Небольшое падение электронной концентрации в пределах 5–8% с 28 июня по 1 июля 2019 г. было зарегистрировано также по данным спутника № 15 (время пролета с 16 до 21 ч по местному времени), траектория которого проходила в направлении юго-восток–север–северо-восток (см. рис. 6, *a*). На основании результатов анализа табл. 2 были рассмотрены изменения электронной концентрации по данным спутников № 7, 12, 17 и 31 для наземных станций ГНСС GPS *сссс*, *p081*, *p020*, *prds*, *p039*, *p777*. На рис. 6, *б* приведены траектории подионосферных точек для спутников № 7, 12, 17 и 31, в табл. 1 расстояния от наземных станций до эпицентров землетрясений.

На рис. 7 в качестве примера приведены изменения электронной концентрации ионосферы на высоте максимума слоя NeF_2 по данным спутника № 7 (время пролета 1:30–7:00) для наземных станций *сссс*, *p573*, *p081*, *p039*, *p020* и *prds*. Из анализа этого рисунка следует, что падение электронной концентрации наблюдалось: 1 июля 2019 г. на 14% (наземная станция *сссс*) и на 15% (наземная станция *p573*); в течении трех дней с 30 июня по 2 июля 2019 г. на ~18%, а также 25 июня на ~20% (наземная станция *p081*); 27 и 29 июня 2019 г. на 16 и

15% соответственно (наземная станция *p039*); с 30 июня по 2 июля 2019 г. на 13–15% (наземная станция *p020*); 29 июня и 1 июля на 9% (наземная станция *prds*).

Значения падения электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы (в %) по данным спутников № 12, 17, 31 на этих же наземных станциях приведена в табл. 3. Из анализа табл. 3 следует, что максимальные значения падения электронной концентрации ионосферы были зарегистрированы 1 июля 2019 г. (за 3 дня до землетрясения с магнитудой $M = 6.4$ и за 4 дня до землетрясения с магнитудой $M = 7.1$) по данным наземных станций *сссс*, *p081* ГНСС, находящихся в радиусе 500 км от эпицентров исследуемых землетрясений и составили от 13 до 22% (спутники № 12, 17, 31).

В этот день было зарегистрировано также падение электронной концентрации ионосферы (на 7–10%) на станциях *p020* и *p039* (1250 и 1300 км от эпицентров соответственно). Изменения электронной концентрации ионосферы наблюдалось и в некоторые другие дни (см. табл. 3), но они были на уровне фоновых значений.

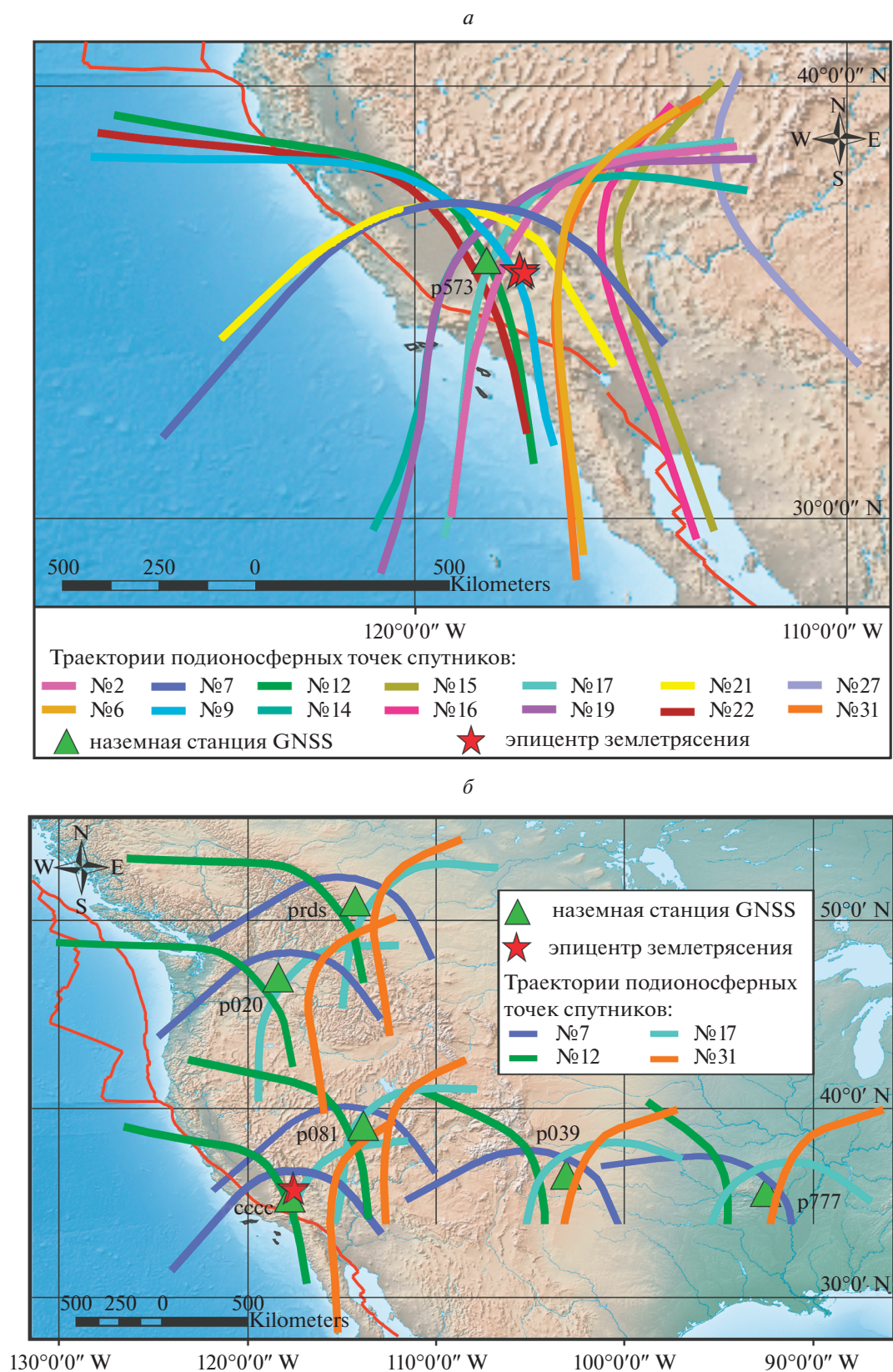


Рис. 6. Траектории подионосферных точек спутников, находящихся в зоне видимости станции p573 (a); карта расположения наземных станций ГНСС и траектории подионосферных точек спутников № 7, № 12, № 17, № 31 (б).

Таблица 2. Падение электронной концентрации (%) в период подготовки землетрясений в Калифорнии в июле 2019 года по данным наземной станции p573 ГНСС GPS

№ спутника	Время пролета (LT)	Падение электронной концентрации, %			
		28.06.19 г.	29.06.19 г.	30.06.29 г.	01.07.19 г.
2	09:30–14:00	–	~10	Относительно 28.06.2019 г. ~10	~10
6	09:00–12:00	–	~10.5	Относительно 28.06.2019 г. ~6	~8
7	01:30–07:00	–	–	–	~15
9	01:00–05:30	–	–	–	~8
12	09:30–14:00	–	~5	Относительно 28.06.2019 г. ~10	~14
14	19:00–00:00	~10.5	~8	–	~8
15	16:00–21:00	–	~7	Относительно 28.06.2019 г. ~5	~8
16	00:00–03:00	–	–	–	~5
17	06:00–11:00	–	~13	–	~13
19	08:00–11:30	–	~15	–	~10
21	16:00–20:00	–	–	–	~5
22	21:00–02:00	–	–	–	~11
27	03:00–07:00	–	–	–	~10
31	20:30–00:00	~11	–	–	~13

По данным <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>, <https://spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php> геомагнитная обстановка в период, предшествующий сейсмическим событиям, была достаточно спокойной индекс Dst не превышал ± 25 нТ. В период времени с 8 по 10 июля 2019 г. было зарегистрировано слабое возмущение -30 – $+40$ нТ. В период времени с 24 июня по 12 июля 2019 г. зарегистрированный поток радиоизлучения на длине волны 10.7 см составил в среднем 67.35 sfu.

Анализ полученных данных показал, что в процессе подготовки сильного землетрясения с магнитудой $M = 7.1$, произошедшего в Калифорнии 5 июля 2019 года, в эпицентральной зоне в ночное время 1 июля 2019 г. в течение ~ 10 ч было зарегистрировано падение электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы, максимальные значения которого составили 18–22%. Такие значения были выявлены по данным станций ssss и p081, расположенных на расстояниях около 15 и 500 км от эпицентров землетрясений.

В ночное время по данным спутника № 7 на станции p081, расположенной к северо-востоку на расстоянии 492 км от эпицентров землетрясений, также было зарегистрировано падение электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы, которое 25 июня 2019 г. составило на 20%, и в течение трех дней с 30 июня по 2 июля 2019 г., составившее 18%.

Таким образом, в процессе подготовки сейсмических событий в Калифорнии в июле 2019 г. по данным станций, находящихся в радиусе около 500 км от эпицентра землетрясения, состоявшегося 5 июля ($M = 7.1$), были выявлены аномалии ионосферной плазмы, проявляющиеся в снижении электронной концентрации в максимуме ионосферы на 10–22% в течение нескольких часов 25 июня (станции ssss, p573 и p081), 1 и 2 июля (станции ssss и p573) и с 30 июня по 2 июля (станция p081).

Для станций, находящихся в радиусе от 500 до 1300 км от эпицентра землетрясения 5 июля 2019 г. ($M = 7.1$), падение электронной концентрации в слое F2 ионосферы, было выявлено: на 16% 27 июня, на 15% 29 июня и на на 7–10% 1 июля (станция p039); с 30 июня по 2 июля на 7–15% (станция p020).

На более удаленных станциях не были зарегистрированы аномалии электронной концентрации или они находились в пределах фоновых флуктуаций и не превышали 9%.

В исследуемый период значительных вариаций геомагнитного поля и повышения солнечной активности не отмечено. В связи с этим на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что выявленные изменения электронной концентрации непосредственно связаны с подготовкой и протеканием землетрясений.

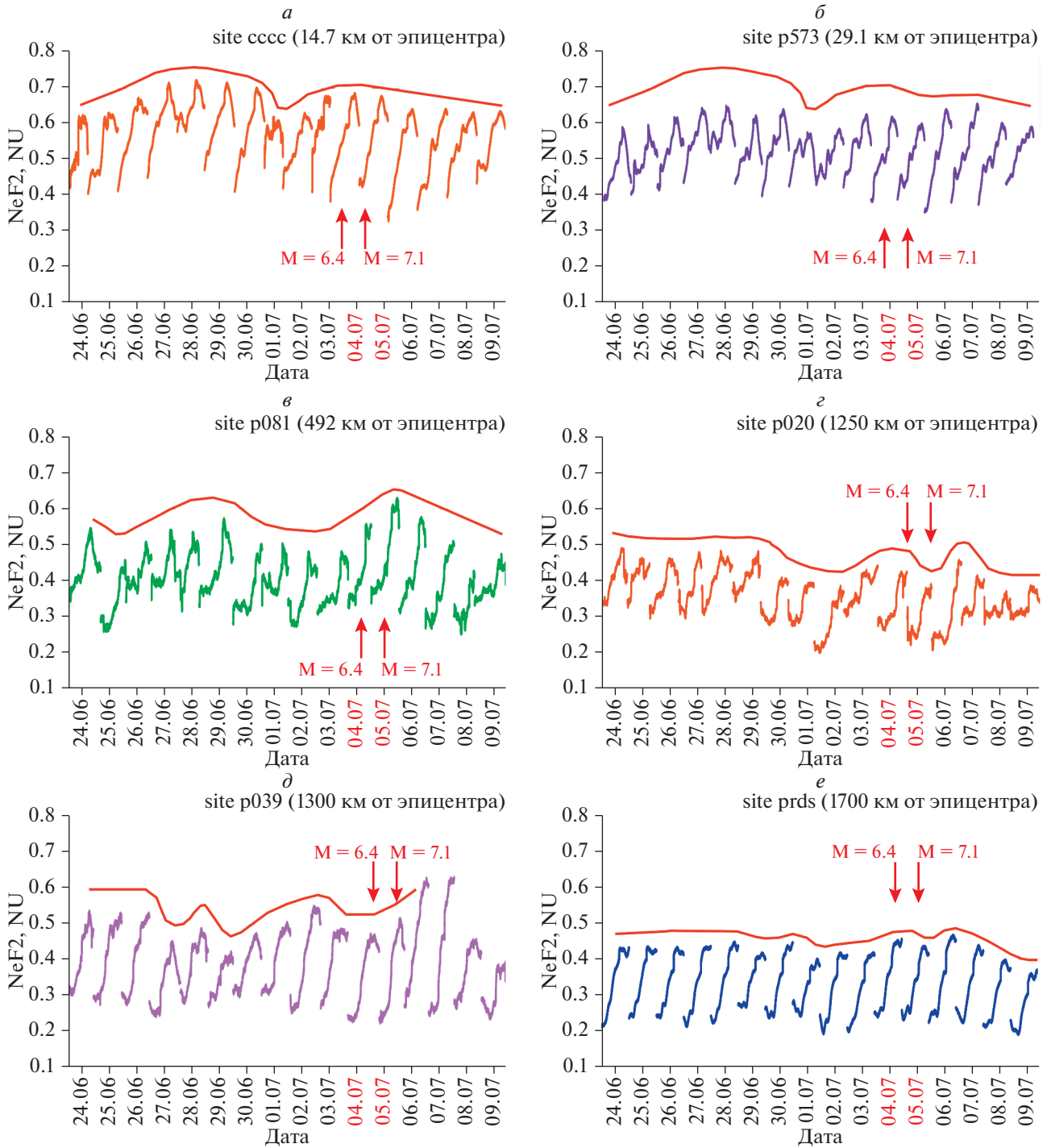


Рис. 7. Изменение электронной концентрации ионосферы в период с 24 июня по 9 июля 2019 г. по данным спутника № 7 для наземных станций cccc (а), p573 (б), p081 (в), p020 (г), p039 (д) и prds (е) ГНСС, расположенных на различных расстояниях от эпицентров землетрясений.

Совместный анализ аномалий различных геофизических полей

Одним из важных статистических показателей линеаментов, закономерно изменяющимся в период подготовки июльских землетрясений в Ка-

лифорнии, является изменение суммарных длин локальных линеаментов разных направлений (Бондур и др., 2012, 2016в; Гапонова и др., 2019).

На рис. 8 проиллюстрирован характер изменения суммарной (осредненной) длины локальных

Таблица 3. Падение электронной концентрации (%) в период подготовки землетрясений в Калифорнии в июле 2019 года по данным спутников № 12, 17, 31 (станции cccc, p081, p020, p039, p777, prds)

Станция ГНСС GPS	№ спутника	Падение электронной концентрации ионосферы, %						
		25.06	26.06	27.06	28.06	29.06	30.06	01.07
cccc	12	~10	—	—	—	~5	~8	~13
	17	—	—	—	—	~10	—	~14
	31	—	—	—	~10	—	—	~22
p081	12	—	—	—	—	—	—	~19
	17	~10	~11	—	—	—	—	~18
	31	—	—	—	—	—	—	~18
p020	12	—	~8	—	—	—	—	~7
	17	—	~12	—	—	—	—	—
	31	—	—	—	—	~10	~11	~10
p039	12	—	~8	—	—	—	—	~7
	17	—	—	~12	—	—	—	—
	31	~8	—	—	~15	~15	—	—
p777	12	—	—	—	—	—	—	—
	17	—	—	~10	—	—	—	—
prds	12	—	—	—	—	—	—	—
	17	—	—	~12	—	~8	—	—

линеаментов (штрихов). По характеру их изменения выделяются две группы направлений (рис. 8). Для первой группы характерна общая (осредненная) тенденция увеличения, а для второй группы характерна общая тенденция уменьшения суммарных длин штрихов.

Анализ рис. 8 позволил выявить общую закономерную тенденцию увеличения длин локальных линеаментов по направлениям 22°, 0°, 338°, 315° или их уменьшения по направлениям 90°,

67°, 45°, 293° с начала наблюдений (3 января 2019 г.). Уменьшение длин локальных линеаментов для направлений 90°, 67°, 45° и 293° происходило до 21 июня 2019 г. Всплески 30 марта и 8 мая 2019 года связаны с влиянием слабых землетрясений с магнитудами около 4. Затем до 30 июня 2019 г. наблюдался их рост и 4 июля 2019 г. зарегистрировано уменьшение длин локальных линеаментов для направлений 90°, 67°, 45° и 293° (в день начала се-

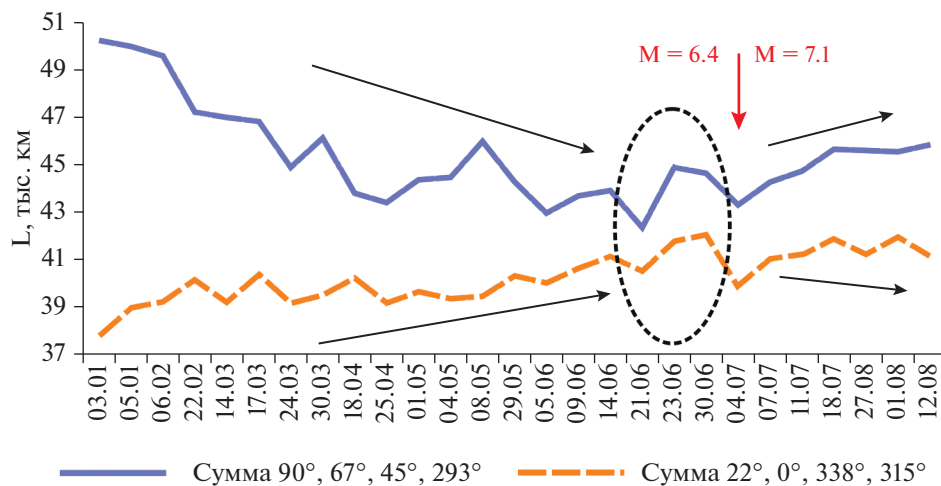


Рис. 8. Изменение суммарных длин локальных линеаментов разных направлений.

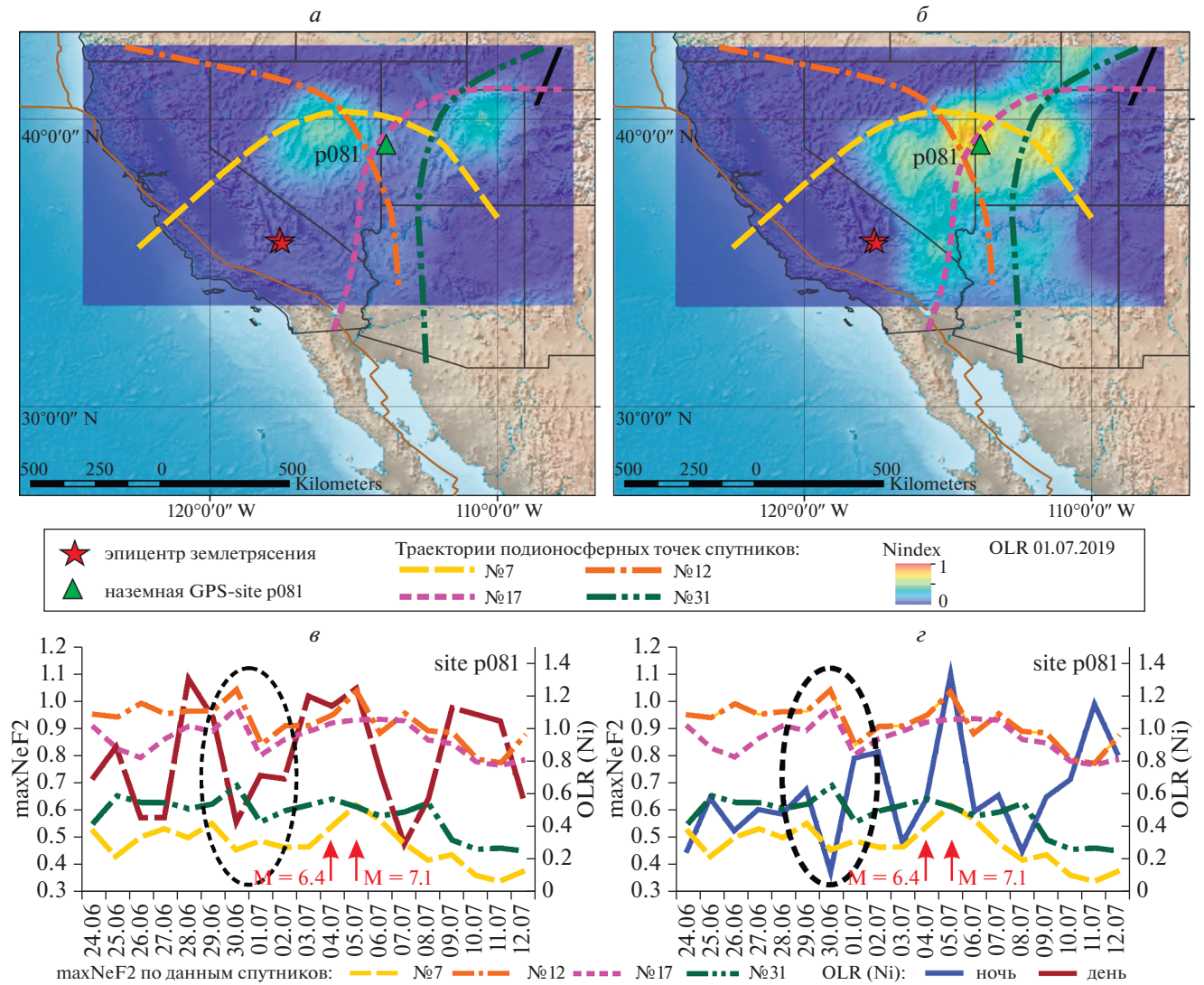


Рис. 9. Траектории подионосферных точек спутников № 7, 12, 17, 31 и расположение дневной (а) и ночной (б) аномалий уходящего длинноволнового излучения по данным прибора AIRS (спутник Aqua); динамика изменений максимальных значений электронной концентрации ионосферы по данным спутников № 7, 12, 17, 31 (станция p081) и максимальных дневных (е) и ночных (з) значений OLR (Ni).

рии июльских землетрясений, в том числе с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$).

Для направлений 22° , 0° , 338° и 315° наблюдалось увеличение длин локальных линейментов до 14 июня 2019 г. Затем характер изменений длин локальных линейментов совпадает с изменениями для направлений 90° , 67° , 45° и 293° , т.е. происходило их уменьшение с 14 по 21 июня, рост с 21 до 30 июня и уменьшение с 30 июня по 4 июля 2019 г. (в день начала серии землетрясений в Калифорнии).

Рассмотрим характер изменений тепловых аномалий и ионосферной плазмы в эти дни. Падение температуры поверхности, температуры приповерхностного слоя, температуры воздуха

(на высоте, соответствующей давлению 1000 гПа) и падение значений уходящего длинноволнового излучения (OLR) было зарегистрировано 21 июня 2019 г. (см. рис. 3). С 26 по 29 июня 2019 года в ночное время суток выявлены противофазные амплитудные колебания, когда при увеличении значений температур уменьшались значения уходящего длинноволнового излучения и наоборот уменьшение температур сопровождалось увеличением значений OLR. Резкое падение значений OLR и увеличение температур было зарегистрировано 30 июня 2019 г. Аномальные вариации ионосферной плазмы были выявлены 25 июня 2019 г., а также 30 июня и 1 июля 2019 г.

На рис. 9а, б приведены местоположения дневных и ночных аномалий уходящего длинноволнового излучения.

волнового излучения, а также траектории подионосферных точек спутников № 7, 12, 17 и 31 для наземной станции p081 ГНСС. Динамика изменений максимальных значений электронной концентрации ионосферы по данным спутников № 7, 12, 17, 31 (наземная станция p081 ГНСС) и максимальных дневных (ϵ) и ночных (ζ) значений OLR (Ni) приведены на рис. 9*в*, *г*.

Анализ рис. 9 показал, что 30 июня 2019 г. характер изменений максимальных значений электронной концентрации ионосферы по данным спутника №7 (время пролета 01:30–07:00), часть траектории которого проходит вдоль параллели и максимально пересекает область дневной и ночной аномалии уходящего длинноволнового излучения (см. рис. 9*а*, *б*), совпадает с характером изменения максимальных значений OLR (Ni) (см. рис. 9*в*, *г*). В этот день наблюдалось резкое падение значений этих характеристик (см. рис. 9*в*, *г*).

Для спутников № 12 (09:30–14:00), 17 (06:00–11:00), 31 (20:30–00:00), чьи траектории пересекают область аномалий уходящего длинноволнового излучения в меридиональном направлении (см. рис. 9*а*, *б*), наблюдалась обратная картина. Из рис. 9*в* и 9*г* следует, что 30 июня 2019 г., в день резкого падения значений OLR (Ni), было зарегистрировано увеличение максимальных значений электронной концентрации ионосферы по данным станции p081 (спутники № 12, 17, 31). Дневные и ночные значения OLR (Ni) увеличились 1 июля 2019 г., при этом максимальные значения электронной концентрации по данным спутников № 12, 17, 31 снизились (см. рис. 9*в*, *г*).

Таким образом, совместный анализ изменений линеаментных систем, тепловых полей и вариаций электронной концентрации ионосферы (NeF2) показал, что:

– 21 июня 2019 г. было выявлено уменьшение длин локальных линеаментов разных направлений и падение температуры поверхности, температуры приповерхностного слоя, температуры воздуха на высоте 1000 гПа и значений OLR;

– с 22 по 30 июня наблюдался рост длин локальных линеаментов разных направлений, при этом с 26 по 29 июня 2019 г. выявлены увеличения значений OLR при уменьшении значений температур и наоборот при увеличении температур понижались значения OLR, а 30 июня 2019 г. было зарегистрировано резкое падение значений OLR и увеличение температур, аномальное падение электронной концентрации ионосферы было выявлено 25 июня 2019 г., а также 30 июня и 1 июля 2019 г.;

– по данным навигационного спутника, находящегося в зоне видимости станции ночью (траектория проходила вдоль параллели и максимально пересекала область тепловой аномалии), характер изменений электронной концентрации

ионосферы 30 июня 2019 г. совпадал с характером изменений OLR.

В случае если спутники, находились в зоне видимости станции в утреннее, дневное и вечернее время (траектории пересекали область тепловой аномалии в меридиональном направлении) наблюдалась обратная картина, т.е. 30 июня 2019 г., в день резкого падения значений OLR (Ni) значения электронной концентрации ионосферы увеличивались, 1 июля 2019 г. значения OLR (Ni) увеличились, а электронная концентрация ионосферы снизилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе по данным космического мониторинга были проанализированы динамика систем линеаментов, вариации тепловых полей и параметров ионосферы при подготовке и протекании сильных землетрясений с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$, произошедших в Калифорнии 4 и 5 июля 2019 г.

Установлено, что рост лучей роз-диаграмм региональных линеаментов, начавшийся 5 июня 2019 г., связан с подготовкой сильных июльских землетрясений и не зависит от многочисленных предшествовавших им сейсмических событий, начиная с даты начала наблюдений (3 января 2019 г.). Выявлена закономерность изменения суммарных длин локальных линеаментов разных направлений, заключающаяся в том, что в период подготовки сильных землетрясений увеличивалась выраженность штрихов согласных с простиранием основных морфоструктур региона и уменьшалась проявленность поперечных к ним штрихов, а также штрихов, связанных с субширотным трансформным разломом. Данное обстоятельство обусловлено увеличением проницаемости (условия растяжения) в первом случае и ее уменьшением (условия сжатия) во втором случае.

Обнаружены аномальные вариации температур (поверхности, приповерхностного слоя атмосферы, воздуха на высоте 1000 гПа) и уходящего длинноволнового излучения за 7–8 дней (27 июня 2019 г.) до землетрясений, происходивших 4 и 5 июля 2019 г. с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$. При этом с увеличением значений температур уменьшались величины уходящего длинноволнового излучения OLR и наоборот снижение температур сопровождалось увеличением их величин. Наиболее сильный рост значений температур на фоне значительного понижения уходящего длинноволнового излучения выявлен в ночь на 30 июня 2019 г. Анализ нормализованных значений OLR позволил выявить их аномальные значения высокой интенсивности в ночное время суток 1 и 2 июля 2019 года в восточной части эпицентральной области.

Максимальное падение электронной концентрации в слое F2 ионосферы было зарегистрировано 25 июня 2019 года (на 20%), а также в течение трех дней с 30 июня по 2 июля 2019 года (от 13 до 22%) по данным станций ГНСС GPS, находящихся в радиусе около 500 км от эпицентров сильных землетрясений, произошедших в Калифорнии 4 и 5 июля 2019 года. Наибольшие аномалии электронной концентрации в слое F2 ионосферы были зафиксированы по данным спутников, находящихся в зоне видимости станций ночью, длительность аномалий составила несколько часов. Для станций, находящихся в радиусе от 500 до 1300 км от эпицентров землетрясений, падение электронной концентрации в слое F2 ионосферы, было выявлено: 27 июня (на 16%), 29 июня (на 15%), а также с 30 июня по 2 июля 2019 г. (до 15%). На более удаленных станциях изменения этого параметра не были зарегистрированы или они находились в пределах фоновых флуктуаций, не превышающих 9%.

Проведенный совместный анализ показал, что первые предвестниковые изменения в эпицентральной зоне были зарегистрированы в литосфере по изменениям роз-диаграмм линеаментов за месяц до сильных землетрясений, состоявшихся 4 и 5 июня 2019 г. и примерно за 20 дней до них по изменениям суммарных длин локальных линеаментов разных направлений. Рост температур (поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и воздуха на уровне 1000 гПа) был зафиксирован за 5–6 дней до этих землетрясений, а OLR за 4–5 дней. Аномалии уходящего длинноволнового излучения, выделяемые по нормализованным данным, были зарегистрированы за 3–4 дня до землетрясений. Максимальное падение электронной концентрации ионосферы в эпицентральной зоне было зарегистрировано за 10 (на 20%) и за 3–5 дней (на 13–22%) до сильных землетрясений в Калифорнии, состоявшихся 4 и 5 июля 2019 г.

Таким образом, анализ линеаментных систем, температур (поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и воздуха на уровне 1000 гПа), уходящего длинноволнового излучения и электронной концентрации ионосферы, проведенный по данным космического мониторинга показал, что выявленные изменения непосредственно связаны с подготовкой и протеканием сильных землетрясений с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$ произошедших 4 и 5 июля 2019 г. в Калифорнии вблизи г. Риджкрест. Это подтверждают наличие связей в системе “литосфера–атмосфера–ионосфера”, а также эффективность использования космических методов для регистрации аномалий геофизических полей для обнаружения предвестников значительных сейсмических событий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках Государственного задания (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.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Андреанов В.А., Смирнов В.М.* Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // *Радиотехника и электроника*. 1993. Т. 38. № 7. С. 1326.
- Бондур В.Г., Воронова О.С.* Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 году // *Изв. ВУЗов. Геодезия и Аэрофотосъемка*. 2012. № 1. С. 79–85.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // *Докл. АН*. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б.* Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2016 (а). Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В.* Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // *Физика Земли*. 2016 (б). № 1. С. 120–132.
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А.* Локальная аномалия напряженного состояния земной коры перед сильным землетрясением ($M = 7.1$) 05.07.2019 г. в районе г. Риджкрест (Южная Калифорния) // *Докл. АН*. 2020. Т. 490. № 1. С. 17–21.
<https://doi.org/10.7868/S2686739720010016>
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // *Докл. АН*. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105. (а)
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // *Исслед. Земли из космоса*. 2005б. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // *Исслед. Земли из космоса*. 2007. № 1. С. 47–56.

- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В.* Предвестникова изменчивость линеаментных систем, выявляемых по космическим изображениям, в период сильных землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 3–12.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416030027>
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В., Зима А.Л.* Исследование из космоса предвестниковой цикличности при подготовке землетрясений, проявляющейся в динамике линеаментных систем // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 1. С. 3–20.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С.* Систематизация ионосферных, геодинамических и тепловых предвестников сильных землетрясений ($M \geq 6$), регистрируемых из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 3–19.
<https://doi.org/10.31857/S020596140002352-8>
- Гапонова Е.В., Зверев А.Т., Цидилина М.Н.* Выявление аномалий линеаментных систем по космическим изображениям во время сильных землетрясений в Калифорнии с магнитудами 6.4 и 7.1 // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 36–47.
- Златопольский А.А.* Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.
- Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.
- Киссин И.Г.* О Системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли. 2013. № 4. С. 145–160.
<https://doi.org/10.7868/S0002333713040054>
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Мейстер К.В., Липеровская Е.В.* Физические модели связей в системе литосфера–атмосфера–ионосфера перед землетрясениями. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 6. Ноябрь–Декабрь 2008. С. 831–843.
- Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.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.
- Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Цидилина М.Н., Гапонова М.В.* Сейсмоионосферные вариации во время сильных землетрясений на примере землетрясения 2010 г. в Чили // Космические исследования. 2018. Т. 56. № 4. С. 21–30.
<https://doi.org/10.31857/S002342060000347-9>
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003, 270 с.
- Acker J.G., Leptoukh G.* Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data, Eos, Trans. AGU. V. 88. № 2 (9 January 2007), pages 14 and 17.
- Akhoondzadeh M., De Santis A., Marchetti D., Piscini A., Jin S.* Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 $M_w = 7.3$ Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data. Advances in Space Research. 2019. V. 64. P. 143–158.
- Amos C.B., Brownlee S.J., Hood D.H., Fisher G.B., Burgmann R., Renne P.R., Jayko A.S.* Chronology of tectonic, geomorphic, and volcanic interactions and the tempo of fault slip near Little Lake, California Geol. Soc. Am. Bull. 2013. V. 125. P. 1187–1202.
- Bennett R.A., Wernicke B.P., Niemi N.A., Friedrich A.M., Davis J.L.* Contemporary strain rates in the northern Basin and Range Province from GPS data: Tectonics. 2003. V. 22. P. 1008.
<https://doi.org/10.1029/2001TC001355>
- 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.
- Cherepanova E.V., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Satellite monitoring of seismic zones based on earthquakes precursors analysis: Central Italy earthquake August 2016 case study // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2018. V. 18. № 2.2. P. 385–394.
- De Santis A., Marchetti D., Spogli L., Cianchini G., Pavón-Carrasco F.J., Franceschi G.D., Di Giovambattista R., Perrone L., Qamili E., Cesaroni C., De Santis A., Ippolito A., Piscini A., Campuzano S.A., Sabbagh D., Amoruso L., Carbone M., Santoro F., Abbattista C., Drimaco D.* Magnetic Field and Electron Density Data Analysis from Swarm Satellites Searching for Ionospheric Effects by Great Earthquakes: 12 Case Studies from 2014 to 2016. Atmosphere. 2019. V. 10. P. 371.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones, Pageoph, 1979. V. 117. P. 1025–1044.
- Economic Losses, Poverty and Disasters 1998–2017. REPORT from Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, UN Office for Disaster Risk Reduction, 2018.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35610.08643>
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013.
- He L., Heki K.* Ionospheric anomalies immediately before $M_w 7.0$ – 8.0 earthquakes. J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. P. 8659–8678.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024012>
- Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2018. V. 18. P. 1013–1036.
<https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>

Marchetti D., Akhoondzadeh M. Analysis of Swarm satellites data showing seismo-ionospheric anomalies around the time of the strong Mexico (Mw = 8.2) earthquake of 8 September 2017. *Advances in Space Research*. 2018. P. 62. № 3. P. 614–623.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.04.043>

Molchan G., Keilis-Borok V. Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect. *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173. P. 1012–1017.

Ouzounov D., Liu D., Kang C., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes, *Tectonophysics*, 2007. V. 431. P. 211–220.

Ouzounov D., Pulinetz S., Hattori K., Taylor P. Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies // AGU Wiley, 2018. 384 p.

<https://doi.org/10.1002/9781119156949>

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer, Berlin, Germany, 2004. 315 p.

Pulinets S.A., Ouzounov D., Ciralo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajacka M., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Kot-

sarenko A. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003, *Ann. Geophys.*, 2006. V. 24. P. 835–849. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-835-2006>

Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V. Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere System, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015. V. 55. № 4. P. 540–558.

Smirnov V.M., Bondur V.G., Smirnova E.V. Ionospheric disturbances during of the thsunamigenic earthquake on navigation system data // Asian Association on Remote Sensing 26th Asian Conference on Remote Sensing and 2nd Asian Space Conference, ACRS 2005. 2005. V. 3. P. 1487–1494.

Xiong P., Shen X. H., Bi Y.X., Kang C.L., Chen L.Z., Jing F., Chen Y. Study of outgoing longwave radiation anomalies associated with Haiti earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010. V. 10. P. 2169–2178.

<https://doi.org/10.5194/nhess-10-2169-2010>

Joint Analysis of Geophysical Field Anomalies Registered from Space during Preparation of Strong Earthquakes in California

V. G. Bondur¹, M. N. Tsidilina¹, E. V. Gaponova¹, and O. S. Voronova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Here we present the results of satellite data use for the study of various geophysical field anomalies that appear due to the interaction of the lithosphere, atmosphere, and the ionosphere. These anomalies were mid- and short-term precursors of strong earthquakes in California on July 4 and 5, 2019 (M = 6.4 and M = 7.1). Precursory changes in the lithosphere were analyzed on the basis of lineament system characteristics obtained through satellite imagery processing (Terra/Aqua satellites, MODIS instrument), as well as the Earth surface temperature variations (Aqua satellite, MODIS instrument). To detect anomalies in the atmosphere that appear during preparation of seismic events, the near-surface atmosphere layer temperature fluctuations were studied, as well as the air temperature at the height of 1000 GPa, and change of outgoing longwave radiation registered by the AIRS instrument (Aqua satellite). To reveal ionospheric anomalies during preparation and occurrence of earthquakes we studied the ionospheric electron concentration at the height of F2 layer maximum based on GPS data. The joint analysis of various geophysical field anomalies detected during satellite monitoring has allowed us to detect precursory changes in the lithosphere a month before the studied strong earthquakes, in the atmosphere 3–6 days before and in the ionosphere 10 and 3–5 days before these earthquakes.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, satellite data, earthquakes, precursors, geophysical fields, ionosphere, lineaments

REFERENCES

Acker J.G., Leptoukh G., Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data, *Eos, Trans. AGU*. V. 88. № 2(9 January 2007), pages 14 and 17.

Akhoondzadeh M., De Santis A., Marchetti D., Piscini A., Jin S. Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 Mw = 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data. *Advances in Space Research*. 2019. V. 64. P. 143–158.

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.

Amos C.B., Brownlee S.J., Hood D.H., Fisher G.B., Burgmann R., Renne P.R., Jayko A.S. Chronology of tectonic, geomorphic, and volcanic interactions and the tempo of fault slip near Little Lake, California *Geol. Soc. Am. Bull.* 2013. V. 125. P. 1187–1202.

Andrianov V.A., Smirnov V.M. Opredelenie vysotnogo profilya elektronnoy kontsentratsii ionosfery Zemli po dvukhchastotnym izmereniyam radiosignalov iskusstvennykh sputnikov Zemli [Determination of the altitude profile of the electron concentration of the Earth's ionosphere from two-frequency measurements of radio signals from artificial Earth satellites] // *Radiotekhnika i elektronika*. 1993. V. 38. № 7. P. 1326 (In Russian).

- Bennett R.A., Wernicke B.P., Niemi N.A., Friedrich A.M., Davis J.L.*, Contemporary strain rates in the northern Basin and Range Province from GPS data: *Tectonics*. 2003. V. 22. P. 1008. DOI: 10.1029/2001TC001355.
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*, 2016 (a), V. 466. № 2. P. 183–186. DOI: 10.1134/S1028334X16020100 (a)
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* The dynamics of the stress state in Southern California based on the geomechanical model and current seismicity: Short term Earthquake prediction // *Russian J. of Earth Sciences*. V. 17. 2017. ES1005. DOI: 10.2205/2017ES000596
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov 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 (b). V. 52. № 1. P. 117–128. DOI: 10.1134/S1069351316010043 (b)
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.* A Local Anomaly of the Stress State of the Earth's Crust before the Strong Earthquake ($M = 7.1$) of July 5, 2019, in the Area of Ridgecrest (Southern California). *Dokl. Earth Sc.* 2020. V. 490. P. 13–17. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20010018>
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof (Monitoring and forecast of natural disasters). Moscow: Nauchny Mir, 2009. 692 p. (In Russian).
- 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 (a). P. 372–375.
- Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005 (b). V. 403. № 5. P. 736–740. (b)
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Systematization of Ionospheric, Geodynamic, and Thermal Precursors of Strong ($M \geq 6$) Earthquakes Detected from Space // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 9. P. 1392–1405. DOI: 10.1134/S0001433818010001
- Bondur V.G., Voronova O.S.* Variatsii ukhodyashchego dlinnovolnogo izlucheniya pri podgotovke i protakanii sil'nykh zemletryaseniy na territorii Rossii v 2008 i 2009 godu [Outgoing longwave radiation variations during preparation and occurrence of strong earthquakes 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*. 2005a. V. 402. № 4. P. 561–567. (a)
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Kosmicheskii metod prognoza zemletryaseniy na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov [A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005b. № 3. P. 37–52 (In Russian)
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registrirovemykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmopasnykh 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., Gaponova E.V., Zima A.L.* Space Methods of Studying the Precursor Cycle Dynamics of the Lineament System before the Preparation of Earthquakes. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 1266–1282 DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819090111>
- Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V.* Precursor Variability of Lineament Systems Detected Using Satellite Images during Strong Earthquakes. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 1283–1291. <https://doi.org/10.1134/S0001433819090123>
- Cherepanova E.V., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Satellite monitoring of seismic zones based on earthquakes precursors analysis: Central Italy earthquake August 2016 case study // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2018. V. 18. № 2.2. P. 385–394.
- De Santis A., Marchetti D., Spogli L., Cianchini G., Pavón-Carrasco F.J., Franceschi G.D., Di Giovambattista R., Perrone L., Qamili E., Cesaroni C., De Santis A., Ippolito A., Piscini A., Campuzano S.A., Sabbagh D., Amoroso L., Carbone M., Santoro F., Abbattista C., Drimaco D.* Magnetic Field and Electron Density Data Analysis from Swarm Satellites Searching for Ionospheric Effects by Great Earthquakes: 12 Case Studies from 2014 to 2016. *Atmosphere*. 2019. V. 10. P. 371.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.*, Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pageoph*, 1979. V. 117. P. 1025–1044.
- Economic Losses, Poverty and Disasters 1998–2017. REPORT from Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, UN Office for Disaster Risk Reduction, 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.35610.08643
- Gaponova E.V., Zverev A.T., Tsidilina M.N.* Vyyavlenie anomalii lineamentnykh sistem po kosmicheskim izobrazheniyam vo vremya sil'nykh zemletryaseniy v Kalifornii s magnitudami 6.4 i 7.1 [Detecting lineament system anomalies during strong 6.4 and 7.1 earthquakes in California from satellite imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 6. P. 36–47 (In Russian).
- He L., Heki K.* Ionospheric anomalies immediately before $M_{w}7.0$ – 8.0 earthquakes. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. P. 8659–8678. <https://doi.org/10.1002/2017JA024012>
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 prod-

- ucts, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013.
- Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018. V. 18. P. 1013–1036. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>
- Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rummyantseva E.F.* Osnovy lineamentnoy tektoniki [Basic lineament tectonics]. Moscow: Nedra, 1986. 144 p. (In Russian).
- Kissin I.G.* On the System Approach in the Problem of Forecasting the Earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2013. V. 49. № 4. P. 587–600. DOI: 10.1134/S1069351313040058
- Liperovskiy V.A., Pokhotelov O.A., Shalimov S.L.* Ionosfernye predvestniki zemletryaseniy [Ionospheric earthquake precursors]. Moscow: Nauka, 1992. 304 p. (In Russian).
- Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Liperovskaya E.V., Meister C.-V.* Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. V. 48. № 6. P. 795–806.
- Marchetti D., Akhoondzadeh M.* Analysis of Swarm satellites data showing seismo-ionospheric anomalies around the time of the strong Mexico (Mw = 8.2) earthquake of 08 September 2017. *Advances in Space Research*. 2018. P. 62. № 3. P. 614–623. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.04.043>
- Molchan G., Keilis-Borok V.* Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect. *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173. P. 1012–1017.
- Ouzounov D., Liu D., Kang C., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes, *Tectonophysics*, 2007. V. 431. P. 211–220.
- Ouzounov D., Pulinets S., Hattori K., Taylor P.* Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies // AGU Wiley, 2018, 384 p. DOI: 10.1002/9781119156949
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova M.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
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.*, Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer, Berlin, Germany, 2004. 315 p.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajacka M., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Kotsarenko A.* Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003, *Ann. Geophys.*, 2006. V. 24. P. 835–849. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-835-2006>.
- Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V.* Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere System, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015. V. 55. № 4. P. 540–558.
- Smirnov V.M., Bondur V.G., Smirnova E.V.* Ionospheric disturbances during of the thsunamigenic earthquake on navigation system data // Asian Association on Remote Sensing 26th Asian Conference on Remote Sensing and 2nd Asian Space Conference, ACRS 2005. 2005. V. 3. P. 1487–1494.
- Smirnov V.M., Smirnova E.V., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Seismo-Ionospheric Variations during Strong Earthquakes Based on the Example of the 2010 Earthquake in Chile // *Cosmic Research*. 2018. V. 56. № 4. P. 310–318. DOI: 10.1134/S0010952518040068
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseniy i predvestniki [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 2003. 270 p. (In Russian).
- Xiong P., Shen X.H., Bi Y.X., Kang C.L., Chen L.Z., Jing F., Chen Y.* Study of outgoing longwave radiation anomalies associated with Haiti earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010. V. 10. P. 2169–2178. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2169-2010>.
- Zlatopolsky A.A.* New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. *Methodology // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011. V. 8. № 3. P. 38–46.