

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА АНОМАЛИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ В ФЕВРАЛЕ 2023 г.

© 2023 г. В. Г. Бондур^а, *, М. Н. Цидилина^а, Е. В. Гапонова^а, О. С. Воронова^а, М. В. Гапонова^а,
Н. В. Феоктистова^а, А. Л. Зима^а

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

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

С использованием космических данных проведены исследования вариаций параметров различных геофизических полей при подготовке разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г. с магнитудами $6 \leq M \leq 7.8$. Установлено, что аномалии этих параметров проявлялись за время от 34 до 25 дней до этих землетрясений в виде резкого понижения значений относительной влажности и уходящего длинноволнового излучения, а также в увеличении плотности локальных линеаментов. За 19–9 дней до анализируемых сейсмических событий выявлены повышения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения, а также значений аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы. В период от 5 до 2 дней до этих землетрясений зарегистрированы понижения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, потока уходящего длинноволнового излучения, полного электронного содержания ионосферы, а также повышение относительной влажности и увеличение длины секущих лучей роз-диаграмм региональных линеаментов. Определены количественные характеристики этих аномалий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космические изображения, сейсмоопасные территории, предвестники землетрясений, геодинамика, линеаменты, тепловые поля, ионосфера

DOI: 10.31857/S0205961423340018, EDN: RHSWXV

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения являются одними из наиболее опасных видов природных катастроф. Несмотря на значительные достижения в технологиях строительства зданий, потери из-за катастрофических сейсмических событий по-прежнему находятся на неприемлемо высоком уровне. Они способны нанести огромный экономический и социальный ущерб. Это наглядно подтвердили трагические события, вызванные разрушительными землетрясениями, произошедшие в феврале 2023 г. на территории Турции (Бондур и др., 2023; Dal Zilio, Ampuero, 2023). После катастрофического землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г., вдоль Восточно-Анатолийского разлома произошло несколько разрушительных землетрясений с магнитудами $6 \leq M \leq 7.5$ и серия афтершоков с магнитудами $4 \leq M < 6$ (МЧС России, 2023; Служба Срочных Донесений, 2023). В результате этих сейсмических событий общее число жертв на территориях Турции и Сирии, превысило 52000 человек (Dal Zilio, Ampuero, 2023).

Трудности предотвращения больших потерь связаны с невозможностью точного определения местоположения очага, силы и времени начала землетрясения (Моги, 1988). Поэтому поиск предвестников сильных ($M \geq 6$) землетрясений является чрезвычайно актуальной, но достаточно сложной задачей (Соболев, Пономарев, 2003; Моги, 1988). В настоящее время для поиска предвестников землетрясений проведено большое количество измерений с использованием самых разных методик для исследований аномальных вариаций множества параметров различных геофизических полей в периоды подготовки и протекания значительных сейсмических событий (Соболев, Пономарев, 2003; Моги, 1988; Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур и др., 2020, 2021а, 2021б, 2022, 2023; Pulinets et al., 2021; Tronin, 2010).

Дистанционные методы исследований обеспечивают большую обзорность, возможность повторного получения информации через определенные промежутки времени, оперативность получения данных, а также возможность применения комплексного анализа этих данных для оценки ди-

намики развития различных явлений, в том числе сейсмических, при оперативном мониторинге (Бондур и др., 2009; Кронберг, 1988; Tronin, 2010). Поэтому использование методов и средств дистанционного зондирования является наиболее перспективным подходом для регистрации различных предвестников землетрясений на обширных, в том числе труднодоступных, территориях.

Такие предвестники связаны с регистрацией из космоса аномалий различных геофизических полей, возникающих в период подготовки и протекания сейсмических событий (Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Бондур, Воронова, 2020; Бондур и др., 2023).

Так, например, особенности структурного изменения эпицентральных зон и кинематики активных разломов перед землетрясением возможно выявить путем исследований космическими методами линеаментных систем (Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур и др., 2016в; Бондур, Гапонова, 2021). Аномалии, возникающие перед землетрясением на разных высотах возможно обнаружить также путем исследования тепловых полей, начиная с поверхности Земли до верхней границы облаков (Бондур, Воронова, 2020, 2022). Аномалии различных параметров ионосферы, например, таких как общее содержание электронов (ТЕС) и др., возникающие в процессе подготовки и протекания сейсмических событий могут регистрироваться средствами спутниковых навигационных систем (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Pulinets, Ouzounov, 2011; Pulinets et al., 2021). Для регистрации аномальной геодинамики перед землетрясениями перспективно также применение методов спутниковой радиоинтерферометрии (Бондур и др., 2021а, 2023; Михайлов и др., 2010; Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021).

Кроме того, для решения проблем исследования сейсмоопасных территорий применяются различные подходы к прогнозу землетрясений (Keilis-Borok et al., 2009; Molchan G., Keilis-Borok, 2008; Киссин, 2013), а также различные методы, например, метод сейсмической энтропии (Акопян и др., 2017), методы, основанные на применении геомеханических моделей (Бондур и др., 2010, 2016а, 2016б); Bondur et al., 2020) и др., в которых используется спутниковая информация.

Наиболее перспективным и эффективным подходом для выявления предвестников сильных землетрясений является совместный анализ различных спутниковых данных, полученных в результате мониторинга геофизических полей, позволяющих выявлять аномальные изменения значимых параметров в системе литосфера–атмосфера–ионосфера (Бондур и др., 2020, 2021б, 2022).

В настоящей работе с использованием космических данных проведены исследования аномальных вариаций ряда геофизических полей во время подготовки и протекания серии разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., в том числе изменений: систем линеаментов; температур земной поверхности и слоя атмосферы; уходящего длинноволнового излучения; относительной влажности; аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы.

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ИССЛЕДУЕМОМ РЕГИОНЕ

Анатолийская система трансформных разломов относится к одному из самых сейсмичных районов мира. В регионе Восточного Средиземноморья и Турции крупное изменение тектоники связано со столкновением Аравийской и Евразийской плит, последовавшим за отступлением Анатолийской плиты вдоль Северных и Восточно-Анатолийских зон разломов. Зона Северо-Анатолийского разлома отделяет Евразийскую плиту от Анатолийской на севере Турции (рис. 1, а). Некоторые из самых разрушительных землетрясений в этом регионе были вызваны подвижками именно вдоль этого разлома (Трифонов, 2017).

За прошедшие 23 года на территории Турции произошло более 7000 землетрясений из них 240 сейсмических событий с магнитудами $5 \leq M \leq 6$ и около 20 событий с магнитудами $M \geq 6$. Наиболее сильные землетрясения ($M \geq 6$) приурочены к глубинным Восточно-Анатолийскому и Северо-Анатолийскому разломам, представляющими собой левый и правый сдвиги. Эпицентры землетрясений нередко образуют цепочки, вытянутые в разных направлениях, из которых преобладают северо-восточные, северо-западные, а в северной и частично западной частях – субширотные, что соответствует основному рисунку разломной тектоники региона. Восточно-Анатолийский разлом является крупной геологической структурой, ориентированной в направлении северо-восток–юго-запад (СВ–ЮЗ) с левосторонним движением. Этот разлом возникает из точки, где он встречается с трансформным разломом Мертвого моря, и заканчивается в точке пересечения трех тектонических плит, а именно Анатолийской плиты, Евразийской плиты и Аравийской плиты, где встречается с Северо-Анатолийским разломом (Трифонов, 2017).

В первые 3 мес. 2023 г. в зоне Восточно-Анатолийского разлома произошло порядка 500 землетрясений магнитудами $M \geq 3.4$. На рис. 1 показано расположение эпицентров землетрясений в Турции с магнитудами $M \geq 4$, (а), а также график магнитуд землетрясений в зоне Восточно-Анатолий-

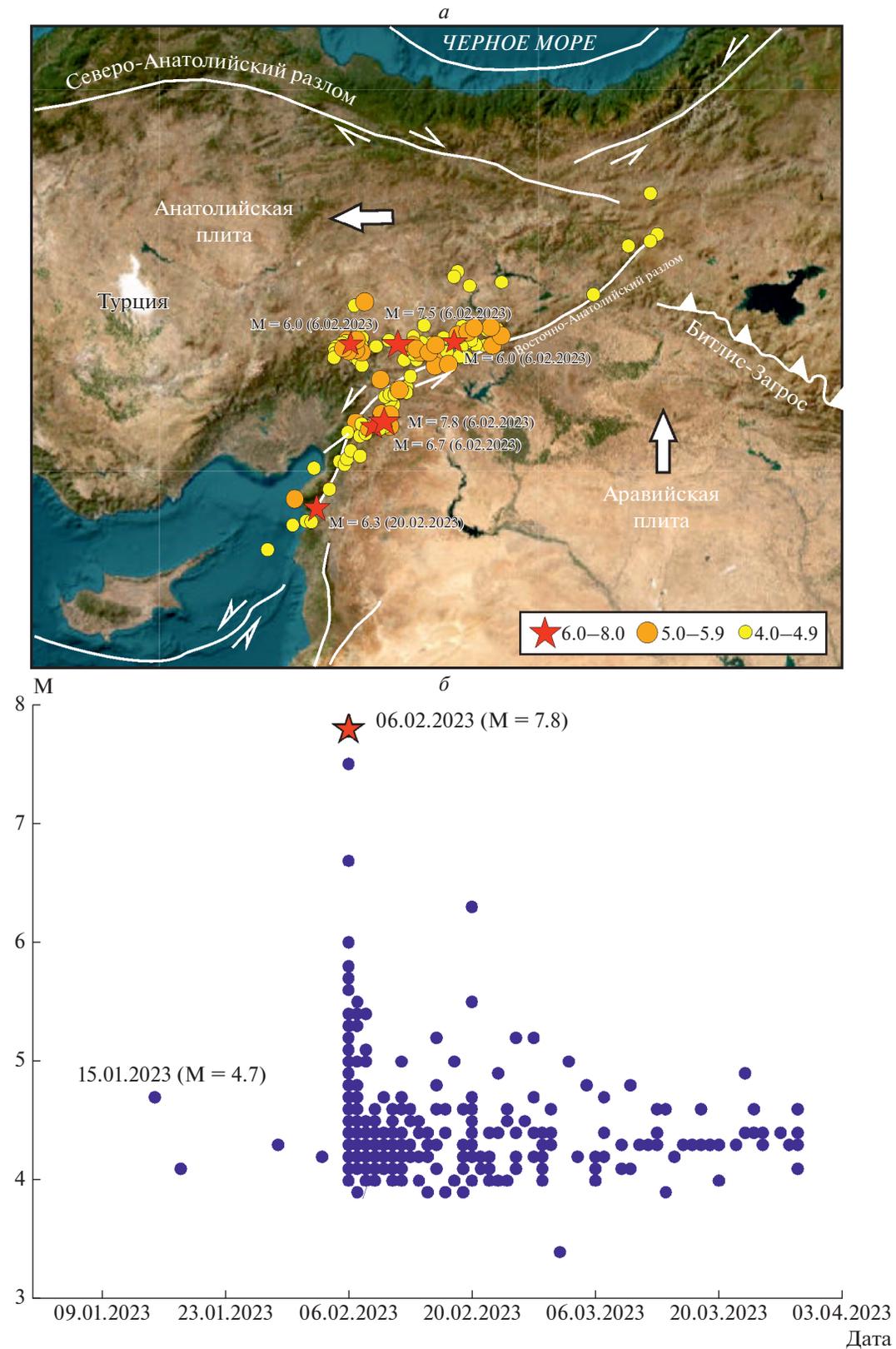


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений в Турции (*a*) и график магнитуд землетрясений в зоне Восточно-Анатолийского разлома, произошедших за первые 3 мес. 2023 г. (*б*).

ского разлома, произошедших за первые 3 мес. 2023 г. (б).

Начиная с 6 февраля 2023 г. на территории Турции произошло 5 разрушительных землетрясений с магнитудами $5 \leq M \leq 7.8$ и около 200 афтершоков с магнитудами от 4 до 6. Эпицентр самого сильного землетрясения с магнитудой $M = 7.8$ располагался в 27 километрах от города Газиантепа. Очаг залегал на глубине 17.9 километров (<http://www.ceme.gsras.ru>; <https://earthquake.usgs.gov>).

В настоящей работе исследован период подготовки и протекания разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции с 6 февраля по 1 марта 2023 г. (максимальная магнитуда $M = 7.8$) и выявлены аномалии значимых параметров некоторых геофизических полей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью выявления изменений значимых параметров различных геофизических полей при подготовке и протекании разрушительных землетрясений, произошедших в феврале 2023 г. на территории Турции, проводился анализ изменений систем линеаментов, температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), интегрированного потока уходящего длинноволнового излучения (OLR), относительной влажности (RHS), аэрозольной оптической толщины (AOD), а также полного электронного содержания ионосферы (TEC).

Анализ систем линеаментов в области исследования осуществлялся по фрагментам космических изображений размерами 100×100 км (400×400 пикселей), полученных со спутника Terra (аппаратура MODIS) с пространственным разрешением 250 метров. Оценка расположения локальных линеаментов (штрихов) разных направлений в пределах изучаемой области осуществлялась путем автоматизированного линеаментного анализа (Бондур и др., 2016в). Для каждого штриха определялось его направление с дискретностью 22.5° , для восьми направлений: $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ$ (угол измерялся от горизонтали справа–налево) (Короновский и др., 1986; Златопольский, 2008). Далее проводился статистический анализ штрихов (локальных линеаментов) и построение протяженных линеаментов (региональных). С использованием программного пакета LESSA (Златопольский, 2008) рассчитывались значения суммарного количества локальных линеаментов (в пикселях), которые пересчитывались в суммарные длины линеаментов (в км) по каждому из восьми направлений. В результате этого строились и анализировались графики изменения суммарных длин локальных линеаментов разных на-

правлений, а также их розы-диаграммы. Суммарные длины линеаментов L рассчитывалась отдельно по каждому из восьми направлений по формуле:

$$L = nr / \cos \varphi \times 1000, \quad (1)$$

где n – количество пикселей, r – пространственное разрешение, φ – угол направленности линеаментов.

Исследования вариаций температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), интегрированного потока уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительной влажности (RHS) в период сейсмической активности на территории Турции, осуществлялись с использованием информационных продуктов 3-го уровня обработки данных, полученных в ночное время суток с помощью прибора AIRS (спутник Aqua) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Hearty et al., 2013). Значения интегрированного потока уходящего длинноволнового излучения находились в диапазоне значений потока энергии от 2 до 2800 ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и вычислялись с использованием алгоритма, описанного в работе (Mehta and Susskind, 1999). Кроме этого, исследовалась относительная влажность, регистрируемая с этого же спутника в приземном слое (Hearty et al., 2013; Бондур, Воронова, 2022).

Для анализа изменчивости исследуемых параметров на различных высотах от земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя (SAT) до верхней границы облачности (OLR), а также относительной влажности (RHS) в период подготовки и протекания землетрясений, произошедших на территории Турции, применялась методика, основанная на использовании интервалов стандартного отклонения данных ($\mu \pm \sigma$ и $\mu \pm 2\sigma$) относительно среднеарифметических значений (μ) за период времени с 2004 по 2022 гг. В качестве зоны исследования использовалась область, радиусом 500 км, включающая территорию, где располагались эпицентры землетрясений с магнитудами 7.8, 7.5, 6.7, 6.0, 6.0, произошедших на территории Турции после 6 февраля 2023 г. (см. рис. 1). В области исследования выявлялись аномальные значения значимых параметров различных геофизических полей, такие, как отклонения их текущих значений от среднегодовых, зарегистрированных в предыдущие годы (с 2004 по 2022 гг.). Результаты представлялись в виде графиков изменения текущих значений этих параметров и их колебаний относительно среднегодовых значений.

Для совместного анализа информационных параметров (SST, SAT, OLR, RHS) была проведена обработка, которая осуществлялась с использованием специально разработанного программного модуля (Бондур, Воронова, 2020). Этот программный модуль позволял оценить качество полученных данных, устранить ошибочные зна-

чения, а также рассчитывать нормализованный индекс (Ni). Для расчета этого индекса использовался подход, при котором определялась разница между текущими значениями исследуемых параметров и их осредненными многолетними значениями, полученными для того же периода времени. Полученные разности делились на стандартные отклонения, что позволило повысить надежность результатов и исключить систематические ошибки (Бондур, Воронова, 2020):

$$Ni = (S_d - S^*)/\sigma, \quad (2)$$

где S_d – данные за текущий день; S^* – среднее арифметическое прошлых лет; σ – стандартное отклонение.

Описанная процедура давала возможность преобразовать диапазоны изменений значений исследуемых параметров к безразмерному виду, позволяющему сопоставлять параметры различных геофизических полей. Нормализованные значения исследуемых параметров усреднялись для области радиусом 500 км от эпицентра главного землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, которое произошло 6 февраля 2023 г. При этом учитывалось также расположение эпицентров других сильных афтершоков, произошедших в этот же день (с магнитудами 7.5, 6.7, 6.0 и 6.0) после землетрясения с $M = 7.8$. Результаты нормализации представлялись в виде графиков изменения исследуемых значимых параметров различных геофизических полей для выявления аномалий этих характеристик в период подготовки и протекания сейсмических событий, свершившихся на территории Турции в начале 2023 г.

При исследовании динамики состояния аэрозолей в атмосфере в период подготовки и протекания исследуемых землетрясений, использовался параметр аэрозольной оптической толщины (AOD) для зеленой полосы спектра электромагнитных волн (0.55 мкм), содержащийся в информационном продукте MCD19A2 уровня L2, который объединяет данные спутников Terra и Aqua (Lyarustin, Wang, 2018).

Анализ данных для выявления изменений аэрозольной оптической толщины в период подготовки и протекания разрушительных сейсмических событий, произошедших на исследуемой территории в первые 3 мес. 2023 г., осуществлялся с использованием сервиса обработки геопространственных данных Google Earth Engine путем получения из информационных продуктов MCD19A2 усредненных ежедневных композитов со значениями AOD. В качестве территории исследования использовалась буферная зона шириной около 140 км вокруг линии разлома в районе эпицентра землетрясения, показанная на рис. 4, а. Такой размер территории исследования обусловлен необходимостью по возможности ис-

ключить влияние других источников аэрозоля, например, УФ-поглощающих частиц пыли, проникающих со стороны Аравийского полуострова (Сирийской пустыни). Для анализа использовались усредненные за сутки значения AOD в буферной зоне только над территорией суши.

Исследование вариаций характеристик ионосферной плазмы осуществлялось на основании анализа данных глобальной навигационной спутниковой системы GPS о полном электронном содержании (TEC) с использованием глобальных ионосферных карт GIM (Noll, 2010). Эти глобальные ионосферные карты содержат значения TEC с разрешением 2.5° по широте (от 87.5° N до 87.5° S) и 5.0° по долготе (180° E до 180° W). Карты GIM формируются с двухчасовым интервалом. Процедуры моделирования и экстраполяции, использованные при их построении, позволяли получать данные для исследуемой территории с малым количеством наземных станций (Noll, 2010). Несмотря на низкое пространственное разрешение этих карт, они обеспечивают в настоящее время наилучшую доступность и наибольшую эффективность данных.

Для анализа вариаций параметров ионосферной плазмы в период подготовки и протекания серии землетрясений, которые произошли в период с 6 февраля по 1 марта 2023 г. на территории Турции были получены значения полного электронного содержания (TEC) за период времени с 1 января по 1 марта с 2001 по 2023 гг. для области в пределах 35° N– 40° N, 35° E– 40° E. В выбранной области исследований располагались эпицентры землетрясений с магнитудами $4 \leq M \leq 7.8$, произошедших в анализируемый период.

Исследование вариаций полного электронного содержания проводилось с использованием двух подходов.

Первый подход заключался в исследованиях полного электронного содержания ионосферы DTEC (в %) методом скользящего окна по данным текущего года (когда произошло землетрясение), которое рассчитывалось по формуле (3):

$$DTEC = ((TEC - MTEC)/MTEC) \times 100\%, \quad (3)$$

где TEC – значения полного электронного содержания на текущий день, полученные из глобальных ионосферных карт GIM; MTEC – значения медианы, рассчитываемые методом скользящего окна за 7 предшествующих суток.

Использование DTEC позволяло отфильтровать ежедневные изменения TEC, связанные с колебаниями уровня ультрафиолетового излучения Солнца, которое заметно влияет на состояние ионосферы (Pulinets et al., 2021).

Второй подход заключался в исследовании изменений полного электронного содержания ионосферы (TEC) при подготовке и протекании

землетрясений, при котором находилась разница между данными текущего значения ТЕС содержания и их многолетними значениями за ту же дату. При использовании второго подхода DТЕС (в %) рассчитывался также по формуле (2), где в качестве обозначений использовались: ТЕС – значения полного электронного содержания, полученные из глобальных ионосферных карт GIM (Noll, 2010) в год, когда произошло землетрясение, МТЕС – значения медианы, которые рассчитывались за годы, предшествующие году землетрясения. С использованием многолетних данных анализировались изменения ТЕС относительно средних значений за предыдущие 22 года (с 2001 по 2022 гг.).

Для проведения совместного анализа вариаций параметров ионосферной плазмы с характеристиками других геофизических полей по многолетним данным был рассчитан нормализованный индекс NТЕС по формуле (4):

$$NTEC = (TEC - \mu) / \sigma, \quad (4)$$

где ТЕС – значения полного электронного содержания на текущий день 2023 г., полученные из глобальных ионосферных карт GIM; μ – среднее арифметическое прошлых лет (2001–2022 гг.) для исследуемого дня; σ – стандартное отклонение.

На заключительном этапе исследований для выявления взаимосвязей между характеристиками различных геофизических полей проводился совместный анализ аномальных вариаций систем линеаментов, тепловых полей, относительной влажности, аэрозольной оптической толщины и параметров ионосферы (Бондур и др., 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Анализ линеаментных систем. Для линеаментного анализа были отобраны и обработаны космические изображения, полученные со спутника Terra (аппаратура MODIS), за временной промежуток с 29 декабря 2022 г. по 1 марта 2023 г. В исследуемый период облачность встречалась на изображениях достаточно часто, поэтому в некоторые дни невозможно оценить динамику линеаментных систем с высокой точностью. Линеаменты строились для эпицентральной области по фрагментам спутниковых изображений размером 100×100 км (400×400 пикселей). При этом эпицентр землетрясения попадал в правый верхний угол фрагмента.

В процессе исследований анализировались временные ряды таких характеристик, как: линии вытянутости и плотности локальных линеаментов (штрихов), схемы, а также розы-диаграммы региональных линеаментов для порога 100, кото-

рые определялись при обработке фрагментов космических изображений (см. рис. 2).

Исследуемый участок располагался в восточной части территории Турции и захватывал зону Восточно-Анатолийского разлома, линейные структуры которого имеют простирания в направлении СВ–ЮЗ (45°). Это проявлялось и на схемах линий вытянутости локальных линеаментов, которые демонстрировали преобладающие направления штрихов (45°), но, начиная с 23 января 2023 г. (т.е. за 14 дней до землетрясения) они постепенно изменяли свое направление в сторону субширотных направлений (показано красными стрелками на второй сверху панели рис. 2). При этом на схеме линий вытянутости локальных линеаментов, полученной 3 февраля 2023 г., т.е. за 3 дня до землетрясения, произошедшего 6 февраля 2023 г. с магнитудой $M = 7.8$ (см. рис. 2), наблюдалось их увеличение для направлений ЮВ–СЗ (315°), секущих к основным структурам рельефа.

До начала серии разрушительных землетрясений, свершившихся 6 февраля 2023 г., произошло еще несколько незначительных форшоков, самый сильный из которых состоялся 15 января 2023 г. ($M = 4.7$).

Увеличение плотности локальных линеаментов (штрихов) начиналось с 10 января 2023 г., то есть за 5 дней до этого форшока и за 27 дней до начала серии сильных землетрясений. Максимум плотности был зафиксирован 3 февраля 2023 г. (т.е. за 3 дня до землетрясений). Это наглядно демонстрируется на схеме плотности локальных линеаментов, приведенной на рис. 2.

Анализ схем роз-диаграмм региональных линеаментов, приведенных на рис. 2 (нижняя панель), показал, что для исследуемых сейсмических событий выявлена закономерность, которая заключалась в изменении секущих линеаментов (направление 315° по отношению к направлению основных структур рельефа). Этот эффект подтверждается результатами работ (Бондур, Зверев, 2005, 2007). Полученные результаты показывают, что за 39 дней до землетрясения (29 декабря 2022 г.) эти эффекты регистрировались по космическим изображениям достаточно слабо, а за 9 дней до землетрясений длина секущих лучей роз-диаграмм резко возросла и 3 февраля 2023 г. (т.е. за 3 дня до землетрясений) достигла примерно равной величины с лучами направления 45° (см. рис. 2, нижняя панель). Анализ рис. 2 (нижняя панель) показывает, что с 23 по 25 января 2023 г. наблюдалось некоторое уменьшение лучей с направлениями 45° . В то же время лучи, имеющие направление ЮВ–СЗ (315°), наоборот увеличивались, достигая максимального значения 3 февраля 2023 г. (за 3 дня до землетрясения), что наглядно демонстрируется на рис. 2 (нижняя панель).

Анализ данных о температуре земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящем длинноволновом излучении и относительной влажности. На рис. 3 представлены графики, которые демонстрируют изменения температуры земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, а также относительной влажности по сравнению с многолетними значениями за прошлые годы с 2004 по 2022 гг. На графиках, приведенных на рис. 3, показаны также ряды средних значений исследуемых параметров для прошлых лет с 2004 по 2022 гг. (черный пунктир). Аномальными значениями этих характеристик считались, те, которые выходили за пределы диапазонов $\mu \pm \sigma$ и $\mu \pm 2\sigma$.

Анализ графиков, представленных на рис. 3, показал, что 2 января 2023 г. были обнаружены аномальные значения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, превышающие на 3–6°C среднегодовые значения за 2004–2022 гг. и выходящие за пределы интервала $\mu \pm \sigma$. Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 3, следует, что 19 января 2023 г. т.е. за 18 дней до главного землетрясения, состоявшегося 6 февраля 2023 г., проявлялись повышения на 4–5°C температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы по сравнению со средними значениями для прошлых лет (2004–2022 гг.). Начиная с 19 января 2023 г., и до дня главного сейсмического события (6 февраля 2023 г.) выявлена тенденция к постепенному понижению температур SST и SAT на 11–14°C (рис. 3). Подобный тренд снижения значений температур перед землетрясением на 7–14°C был выявлен и в работе (Бондур, Воронова 2020) при исследованиях тепловых полей в период подготовки землетрясения с магнитудой $M = 6.7$, произошедшего 24 января 2020 г. в Турции в районе Восточно-Анатолийского разлома.

Исследования изменений температуры земной поверхности до разрушительных землетрясений, происходивших в Турции с 6 февраля 2023 г., были описаны в работе (Akhoondzadeh, Marchetti, 2023), где также примерно за 18 дней до главного сейсмического события выявлено понижение значений SST на 5–8°C.

В результате анализа динамики относительной влажности (RHS) за период времени с 1 января по 1 марта 2023 г., представленной на рис. 3 (нижняя панель), первое появление аномальных значений относительной влажности было зафиксировано 3 января 2023 г., в виде сильного понижения RHS на величину до 65%, выходящего за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$. С 3 по 8 января 2023 г. был выявлен рост значений RHS с достижением максимального превышения среднего многолетнего значения (за период времени с 2004–2022 г.) на 24% (8 января 2023 г.).

Начиная с 8 до 11 января 2023 г. происходило понижение значений RHS на 16%, а затем с 12 по 15 января 2023 г. выявлен их рост, достигший локального максимума (превышение на 5% средних многолетних значений) 15 января 2023 г., когда произошел форшок с магнитудой $M = 4.7$ (см. рис. 3, нижняя панель). Затем превышения среднего многолетнего уровня, периодически выходящие за пределы интервала $\mu \pm \sigma$, сохранялись, вплоть до начала серии разрушительных землетрясений в Турции, произошедших 6 февраля 2023 г. (см. рис. 3, нижняя панель). Анализ рис. 3 показал, что, начиная со 2 февраля 2023 г., выявлена тенденция к снижению значений RHS, продолжавшемуся до 8 февраля 2023 г.

В последующие дни происходил рост значений RHS, достигший 15 февраля 2023 г. максимума превышения этого параметра над средним многолетним уровнем (на 14%). Такой рост значений RHS предшествовал повышенной афтершоковой активности в исследуемом регионе (см. рис. 3).

Из анализа значений уходящего длинноволнового излучения, представленных на рис. 3 (верхняя панель) следует, что аномально низкие значения OLR были выявлены 12 января 2023 г. (173 Вт/м²) и выходили за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$. Данное понижение значений возможно связано с землетрясением с магнитудой 4.7, произошедшим 15 января 2023 г. С 12 по 21 января 2023 г. происходил интенсивный рост потока энергии уходящего длинноволнового излучения (см. рис. 3, верхняя панель). В этот период времени его значения достигали границ интервала $\mu \pm 2\sigma$ с максимальным превышением среднего многолетнего значения на величину 27 Вт/м², выявленным 21 января 2023 г. (см. рис. 3, верхняя панель). Повышенные значения уходящего длинноволнового излучения сохранились до 27 января 2023 г.

Анализ рис. 3 показал, что, начиная с 27 января по 3 февраля 2023 г. наблюдались колебания значений OLR внутри интервала $\mu \pm \sigma$. При этом 4 февраля 2023 г. (за 2 дня до серии произошедших землетрясений, начиная с 6 февраля 2023 г.) было обнаружено аномальное падение (до 156 Вт/м²) значений уходящего длинноволнового излучения, которые вышли за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$ (см. рис. 3, верхняя панель).

Анализ аномалий аэрозольной оптической толщины. В ряде работ, например, (Okada Y. et al., 2004; Ganguly N.D., 2016; Akhoondzadeh M., 2015; Soujan Ghosh et al., 2023 и др.) была обнаружена взаимосвязь аэрозольных аномалий, в том числе выявленных по спутниковым данным, с сильными землетрясениями.

В настоящей работе исследовались изменения аэрозольной оптической толщины (AOD), зарегистрированных по спутниковым данным в период подготовки и протекания разрушительных

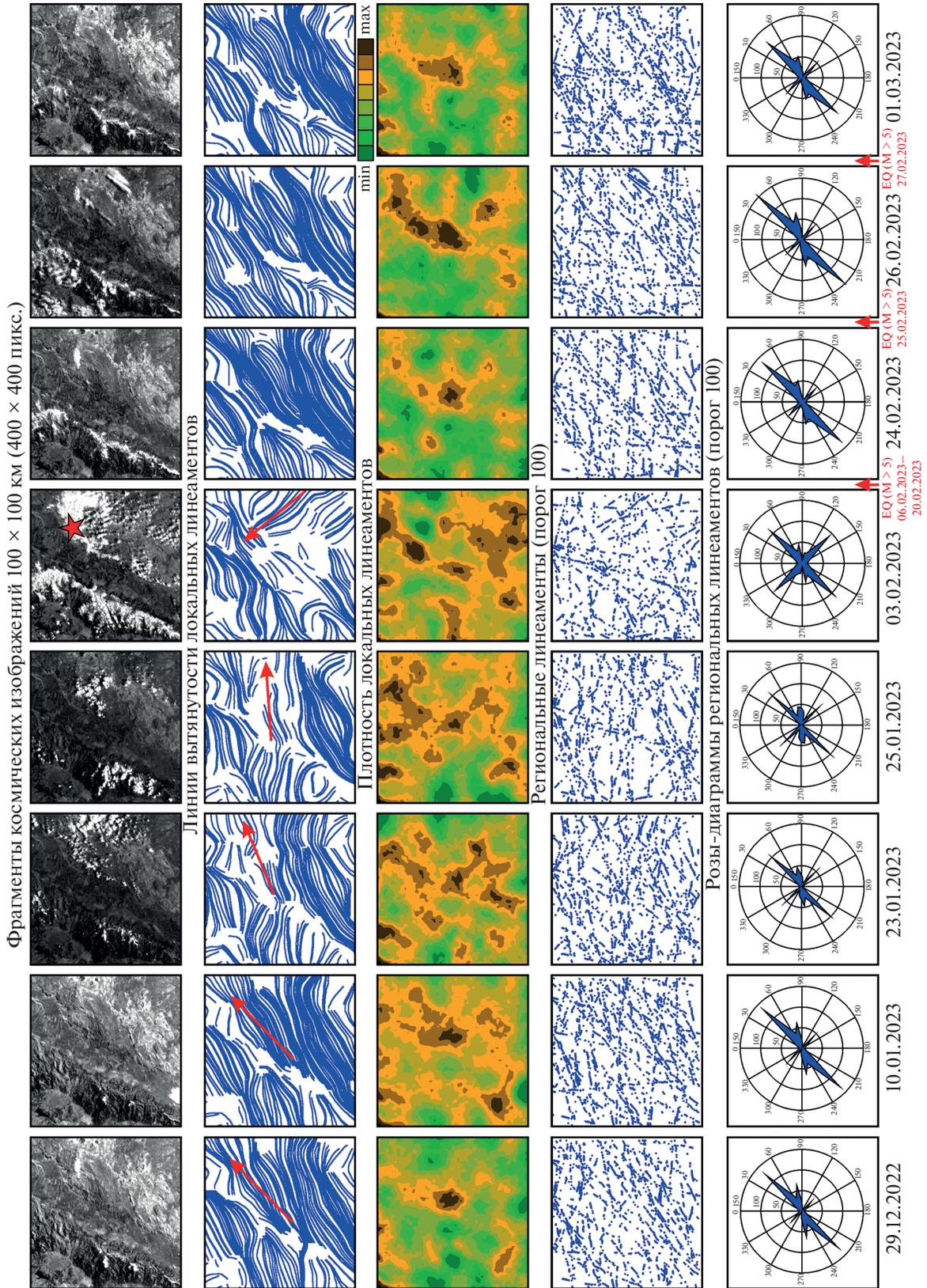


Рис. 2. Фрагменты спутниковых изображений и общая схема характеристик линеаментов: линии вытянутости и плотности локальных линеаментов (штрихов); схемы и розы-диаграммы региональных линеаментов для периода подготовки и протекания землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г.

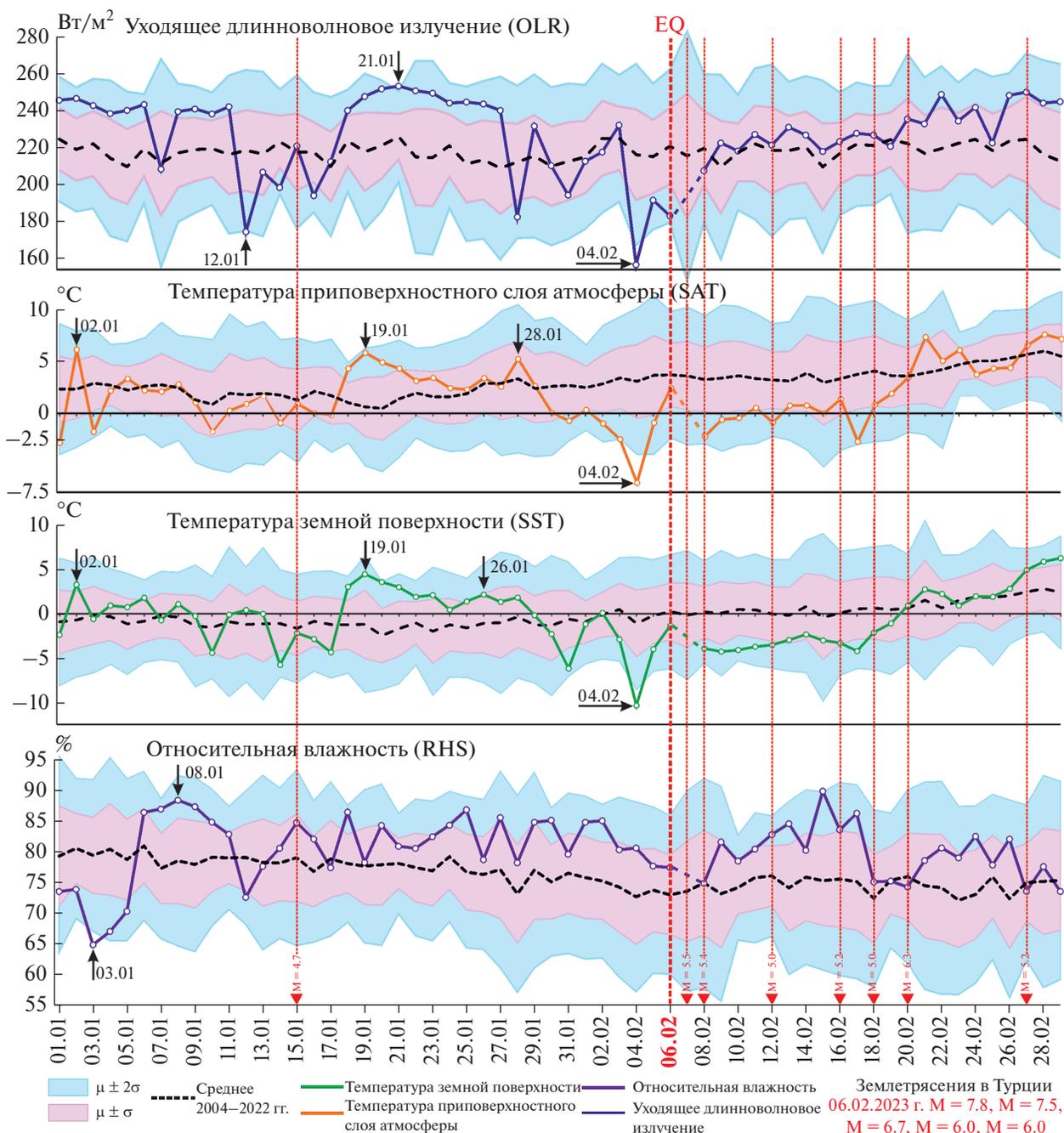
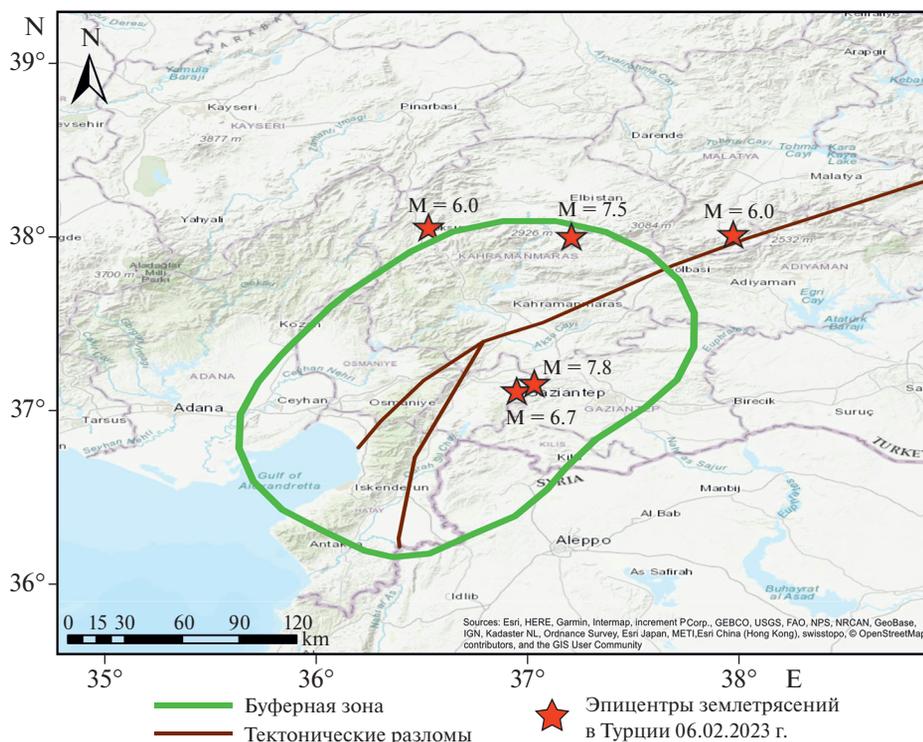


Рис. 3. Вариации значений температур поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR), а также относительной влажности (RHS) в период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. для землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г.

землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г. На рис. 4, а показана территория исследования, в качестве которой использовалась буферная зона шириной около 140 км вокруг линий разломов в районе эпицентра землетрясения. На рис. 4, б приведены среднесуточные значения AOD (синяя линия), зарегистрированные

со спутников Terra и Aqua (прибор MODIS). На этом же рисунке представлены также среднее значение AOD за 2022 г. (зеленая линия), среднее значение этого параметра за исследуемый период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. (черная пунктирная линия) и среднесуточные значения за предыдущие 10 лет с 2013 по 2023 г. (голубая ли-

a



б

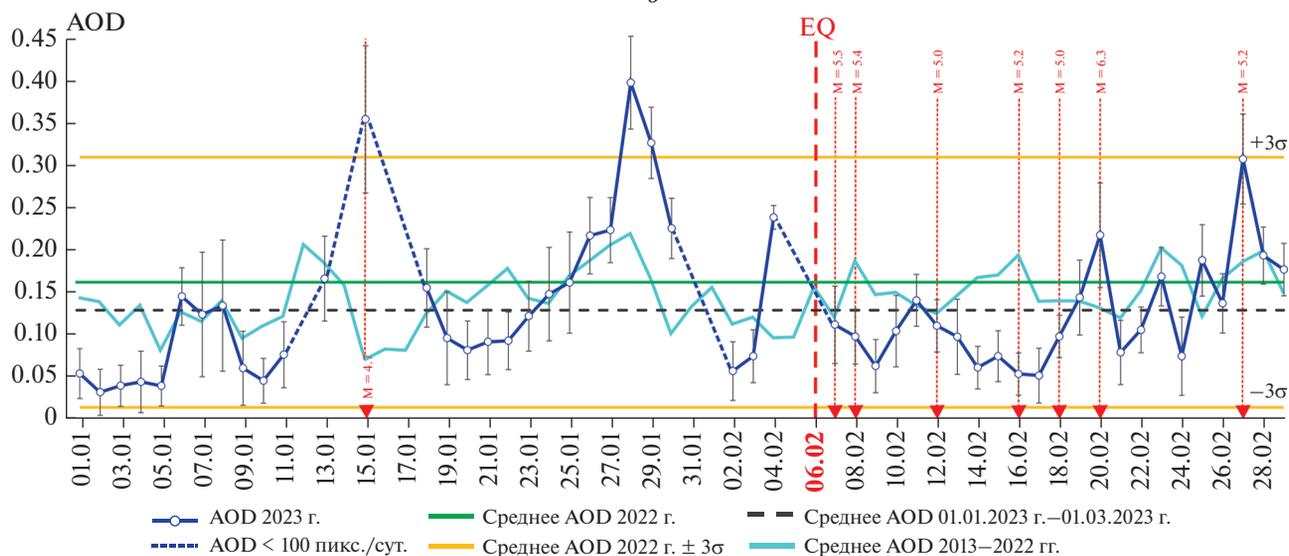


Рис. 4. а – область исследования; б – изменения среднесуточных значений AOD в период подготовки землетрясений, произошедших в Турции с 6 февраля 2023 г. по данным спутников Terra/Aqua (прибор MODIS). Синяя линия – среднесуточные значения AOD за исследуемый период, черный пунктир – среднее значение AOD за исследуемый период, синий пунктир – ненадежные значения в облачные дни, зеленая линия – среднегодовое (2022 г.) значение AOD, желтые линии – среднее AOD (2022) \pm 3 σ , голубая линия – среднесуточные значения AOD за 10 лет (2013–2022 г.).

ния). Синим пунктиром на рис. 4, б обозначены ненадежные среднесуточные значения AOD в облачные дни.

Анализ рис. 4, б показал, что в исследуемый период подготовки и протекания землетрясений,

происходивших с 6 февраля по 1 марта 2023 г., наблюдались в целом пониженные значения AOD относительно среднегодового значения за предыдущий 2022 г. (зеленая линия). Исключениями являлись значения AOD, зарегистрированные из космоса 15 января и 28 января 2023 г. В эти дни

происходило резкое повышение среднесуточных значений AOD, превышающее предел в три стандартных отклонения (3σ) от среднегодового значения (желтые линии). 15 января 2023 г. было зарегистрировано землетрясение магнитудой $M = 4.7$. При этом необходимо отметить, что значение AOD (0.35) для 15 января 2023 г. не является надежным, так как в этот день над исследуемым регионом была облачность.

Из анализа рис. 4, б следует, что с 21 по 28 января 2023 г. в исследуемой области был выявлен стабильный рост значений AOD, достигший 28 января 2023 г. максимального значения (0.39), значительно превышавшего уровень 3σ .

Затем с 28 января по 2 февраля 2023 г. происходило понижение значений AOD и небольшое их повышение со 2 по 4 февраля 2023 г., достигшее максимума (более 0.25) 4 февраля 2023 г. (за 2 дня до землетрясения, состоявшегося 6 февраля 2023 г.). Далее в период с 28 по 17 февраля наблюдалась тенденция к понижению значений AOD. Затем 20 и 27 февраля 2023 г. были выявлены пиковые значения AOD, достигавшие величин 0.24 и 0.309 в дни афтершоковых землетрясений с магнитудами $M = 6.3$ и $M = 5.2$ соответственно.

Таким образом, на основании результатов анализа графиков, приведенных на рис. 4, б, к возможным предвестниковым аномалиям AOD можно отнести повышения их значений, зарегистрированные 28 января 2023 г. до 0.39 (за 9 дней до начала сейсмических событий в регионе), а также 4 февраля 2023 г., величиной более 0.25 (за 2 дня до серии разрушительных землетрясений, начавшихся 6 февраля 2023 г.) При этом перед всеми проанализированными значительными сейсмическими событиями наблюдалась тенденция к снижению значений AOD которая начиналась за 8-9 дней и заканчивалась за 3-6 дней до сейсмических событий с $M = 4.7-7.8$ в исследуемом регионе. Кроме этого в дни землетрясений, произошедших 15 января 2023 г. ($M = 4.7$), 20 февраля 2023 г. ($M = 6.3$), а также 27 февраля 2023 г. ($M = 5.2$) обнаружены локальные максимумы значений AOD, достигавшие величин 0.35, 0.24 и 0.309 соответственно.

Анализ аномалий полного электронного содержания ионосферы (TEC). Для выявления аномальных вариаций параметров ионосферы при подготовке землетрясений использовались два подхода в соответствии с методикой проведения исследований, изложенной выше. При использовании первого подхода анализировались изменения относительных значений полного электронного содержания (DTEC, %), рассчитанные методом скользящего окна (за 7 предшествующих суток) по данным за 2023 г. При использовании второго подхода проводился анализ изменений полного электронного содержания ионосферы (TEC,

TECU) относительно многолетних значений (2001–2022 гг.). Все исследуемые ионосферные параметры рассматривались для сейсмоопасной территории в пределах $35^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$, $35^{\circ}\text{E}-40^{\circ}\text{E}$, т.к. именно в пределах этой области была зарегистрирована серия землетрясений, происходивших в период времени с 6 февраля по 1 марта 2023 г. (см. рис. 5, а).

На рис. 5, б в цветовых тонах приведено двумерное распределение DTEC (%), рассчитанное методом скользящего окна (за 7 предшествующих суток) в период времени с 8 января по 1 марта 2023 г. Из анализа рис. 5, б следует, что наиболее сильные положительные аномалии DTEC наблюдались:

- в дневные часы с 12 по 16 января 2023 г., когда значения DTEC изменялись в пределах 25–59%, достигая максимальных значений (DTEC = 54–59%) 15 января 2023 г. примерно с 13 до 19 ч. местного времени;

- в дневные и вечерние часы 18 января 2023 г., когда значения DTEC составляли 30–46%;

- в ночные часы 15, 16 и 21 января 2023 г. когда значения DTEC составляли 28, 25 и 35% соответственно;

- в утренние и дневные часы с 6 по 9 февраля 2023 г., когда значения DTEC изменялись в пределах 31–66%, достигая максимальных значений (DTEC = 66%) 6 февраля 2023 г. в 15 ч. местного времени;

- в ночные часы 6 и 15 февраля 2023 г., когда значения DTEC составляли 26–35 и 49–59% соответственно;

- в дневные и вечерние часы 27 февраля 2023 г. когда значения DTEC составляли 35–57%.

Анализ рис. 5, б показал, что отрицательные аномалии DTEC были выявлены в дневные часы с 27 января по 1 февраля 2023 г. (15–22%), с 17 по 20 февраля 2023 г. (16–24%). При этом наиболее сильные из них были зарегистрированы с 11 до 17 ч. местного времени 29 и 30 января 2023 г. (DTEC = 18–22%), в 15 ч. 1 февраля 2023 г. (DTEC = 18%), а также с 15 до 17 ч. 19 и 20 февраля 2023 г. (DTEC = 22–24%).

Из анализа рис. 5, б следует, что в ночные часы отрицательные аномалии наблюдались с 3 до 5 ч. местного времени 17 января, а также 3, 19, 25, 27 февраля и 1 марта 2023 г. (DTEC = 10–20%).

Для исключения вклада в ионосферные возмущения вариаций геомагнитного поля рассматривалось поведение геомагнитного индекса Dst (nTl) в период с 1 января по 1 марта 2023 г. (см. рис. 5, в) (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

Анализ значений геомагнитного индекса Dst (nTl), приведенных на рис. 5, в, позволил выявить возмущения геомагнитного поля в следующие дни:

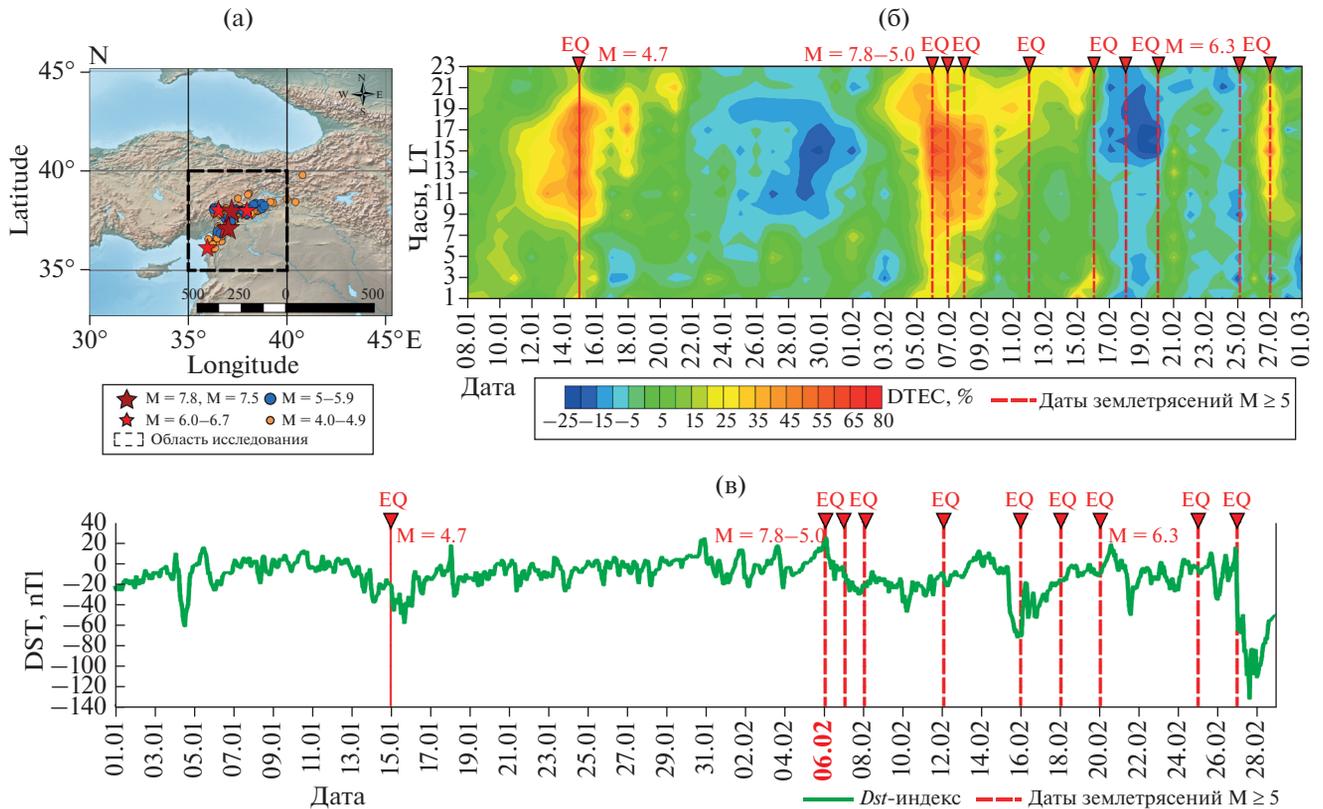


Рис. 5. *a* – область расчета DTEC (%); *б* – двумерное распределение DTEC (%), рассчитанное методом скользящего окна (за 7 предшествующих суток) в период с 8 января по 1 марта 2023 г. при подготовке и протекании серии землетрясений в Турции, произошедших в период с 6 февраля по 1 марта 2023 г.; *в* – график изменений геомагнитного индекса *Dst* (nTl) в период с 1 января по 1 марта 2023 г.

- 4 января 2023 г. ($Dst = -61$ nTl);
- 13–16 января 2023 г. ($Dst = -32...-58$ nTl);
- 09–10 февраля 2023 г. ($Dst = -30...-47$ nTl);
- 15–17 февраля 2023 г. ($Dst = -38...-72$ nTl);
- 21 февраля 2023 г. ($Dst = -50$ nTl);
- 26 февраля–1 марта ($Dst = -38...-132$ nTl).

Спокойная геомагнитная обстановка была зарегистрирована в период времени с 17 января по 6 февраля 2023 г. (индекс *Dst* находился в пределах ± 30 nTl).

Анализ геомагнитной обстановки показал, что аномальные вариации ионосферы, наблюдаемые 13–16 января, 09–10, 15–17, 27 февраля и 1 марта 2023 г. могут быть связаны с возмущением геомагнитного поля Земли. В то же время 6 февраля 2023 г. началась серия сильных землетрясений в исследуемой области ($M = 5.0-7.8$), а 15 января 2023 г. было зафиксировано землетрясение с магнитудой $M = 4.7$. Поэтому не исключено наложение нескольких эффектов.

Таким образом, анализ относительных изменений полного электронного содержания, рассчитанных по спутниковым данным с 1 января по 1 марта 2023 г. (рис. 5, б) и изменений геомагнит-

ного индекса *Dst* за этот период времени (см. рис. 5, в), позволил выявить возможные предвестниковые ионосферные аномалии, а именно:

- положительные аномалии DTEC, проявившиеся 18 января 2023 г. (13–19 ч.) и 21 января 2023 г. (21–22 ч) ($DTEC = 30-46\%$), т.е., зарегистрированные за 16 и 19 дней до начала серии разрушительных землетрясений в Турции, произошедших 6 февраля 2023 г.;

- отрицательные дневные аномалии DTEC, зарегистрированные 29 и 30 января и 1 февраля 2023 г. ($DTEC = -18...-22\%$) и отрицательные ночные аномалии DTEC, зарегистрированные 3 февраля 2023 г. ($DTEC = -17\%$), т.е. за 8, 7, 5 и 3 дня до начала серии землетрясений в Турции, произошедших 6 февраля 2023 г.

Рассмотрим изменения полного электронного содержания ионосферы в период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. относительно того же временного интервала за период с 2001 по 2022 г., представленные на рис. 6, а, б, б.

На рис. 6, а, б, б приведены временные ряды полного электронного содержания (TEC) в период с 1 января по 1 марта 2023 г., средние многолет-

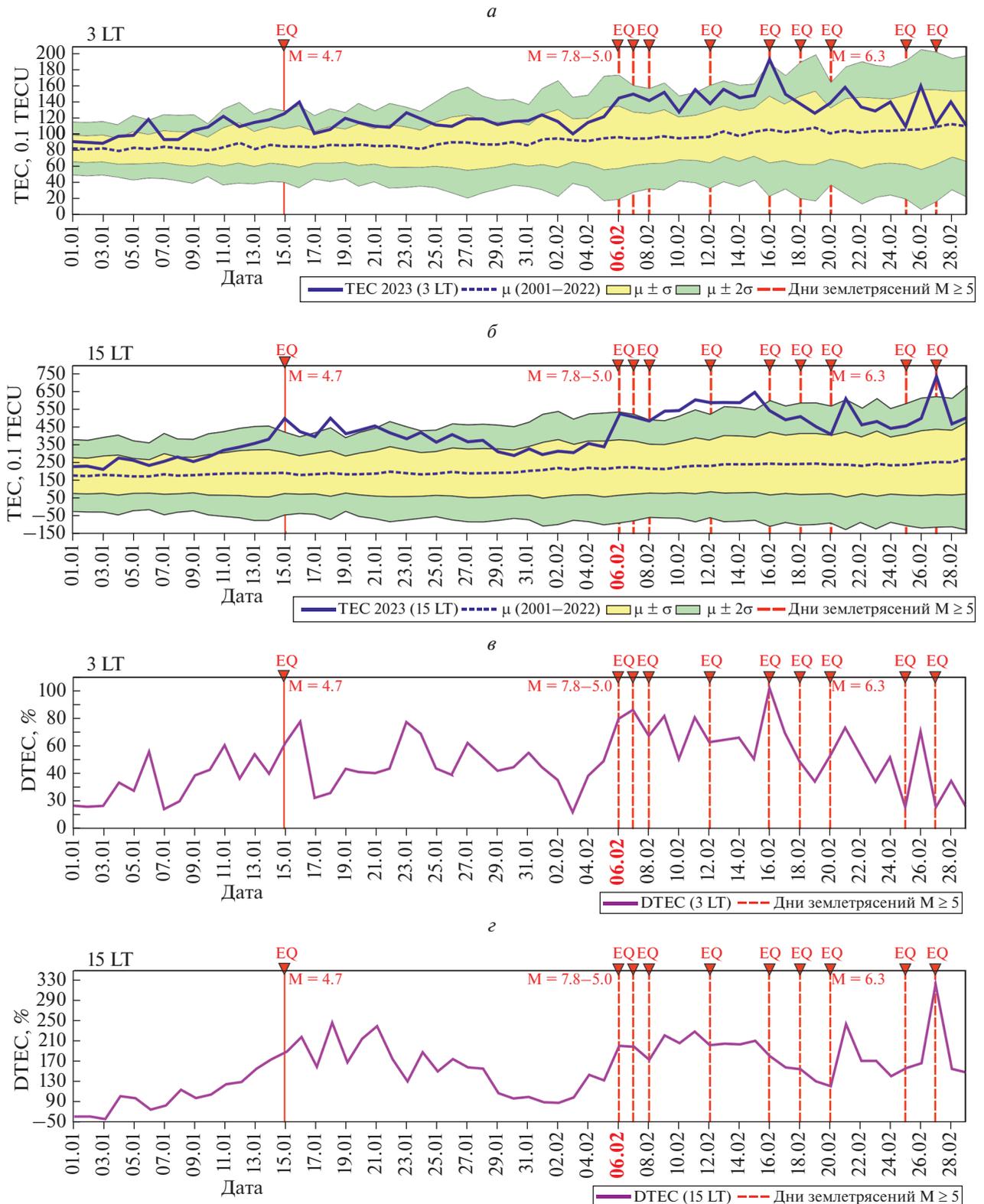


Рис. 6. Временной ряд TEC (синяя сплошная линия) с 1 января по 1 марта 2023 г., средние многолетние значения TEC 2001–2022 г. (синяя пунктирная линия) для 3 ч. (а) и 15 ч. (б) местного времени, интервал $\mu \pm \sigma$ (желтое поле), интервал $\mu \pm 2\sigma$ (светло-зеленое поле). Временной ряд отклонений TEC относительно многолетних значений 2001–2022 гг. (DTEC) для 3 ч. (в) и 15 ч. (г) местного времени.

Таблица 1. Аномалии DTEC (2023 г.), выявленные в период с 17 января по 6 февраля 2023 г., рассчитанные по данным 2023 г. и аномалии отклонений общего электронного содержания ионосферы от среднего значения за 2001–2022 гг. (DTEC многолетний).

	DTEC (2023 г.)		DTEC многолетний	
	ночные	дневные	3 ч (LT)	15 ч (LT)
max DTEC	21.01.2023 г.	18.01.2023 г.	23.01.2023 г. 24.01.2023 г.	18.01.2023 г. 21.01.2023 г. 24.01.2023 г.
min DTEC	03.02.2023 г.	29.01.2023 г. 30.01.2023 г. 01.02.2023 г.	03.02.2023 г.	29.01–03.02.2023 г.

ние значения TЕС за 2001–2022 г. и стандартные отклонения от средних многолетних значений для 3 ч. и 15 ч. местного времени.

Анализ рис. 6, а, б, в показал, что значения TЕС в период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. были выше средних значений TЕС в аналогичные даты за период времени в 2001–2022 гг. Большая часть значений TЕС выходила за пределы интервала $\mu + \sigma$ (см. рис. 6, а, б, в). Значения TЕС, выходящие за пределы интервала $\mu + 2\sigma$, были зарегистрированы 6, 16 января и 16 февраля 2023 г. для 3 ч. местного времени, а также 15 января, с 18 по 21 января, с 9 по 15, 21 и 27 февраля 2023 г. для 15 ч. местного времени (см. рис. 6, а, б, в).

Высокие значения TЕС в периоды времени 6 и 15–16 января 2023 г., а также 9–10, 15, 21 и 27 февраля 2023 г. могут быть связаны с геомагнитными возмущениями (см. рис. 5, в). Были также зарегистрированы уменьшения значений TЕС относительно предыдущих дней 3 февраля 2023 г. для 3 ч. и в период с 29 января 2023 г. по 3 февраля для 15 ч. (б, а, б, в).

Рассмотрим изменения TЕС относительно многолетних данных за 2001–2022 г. (DTEC) и сравним их с изменениями аналогичной характеристики, рассчитанной скользящим окном по данным за 2023 г. На рис. 6, в, г приведены временные ряды отклонений общего электронного содержания ионосферы относительно многолетних значений за 2001–2022 гг. (DTEC) для 3 ч. (в) и 15 ч. (г) местного времени. При этом не будем рассматривать ионосферные аномалии, которые могли быть связаны с геомагнитными возмущениями (график изменений индекса Dst представлен на рис. 5, в), анализ которых представлен выше.

Проанализируем аномалии, которые были зарегистрированы в период времени с 17 января до 6 февраля 2023 г. перед началом серии сильных землетрясений в Турции, когда геомагнитный индекс незначительно изменялся в пределах ($Dst = \pm 30$ nTl). В этот период времени высокие значения DTEC были зарегистрированы 18, 21 и 24 января по данным для 15 часов местного вре-

мени (см. рис. 6, г) и 23, 24 января по данным для 3 ч. местного времени (см. рис. 6, в). Падение DTEC было выявлено в период с 29 января по 3 февраля 2023 г. для 15 ч. (см. рис. 6, г) и 3 февраля 2023 г. для 3 ч. (см. рис. 6, в), то есть за 8–3 дня до главного сейсмического события ($M = 7.8$), состоявшегося 6 февраля 2023 г.

В табл. 1 приведены дни появления максимальных и минимальных значений DTEC в период времени с 17 января по 6 февраля 2023 г., рассчитанных с использованием двух подходов (скользящим окном по данным 2023 г. и по многолетним данным).

Анализ полученных результатов позволил выявить в период с 17 января по 6 февраля 2023 г. возможные предвестниковые аномалии полного электронного содержания ионосферы при подготовке серии землетрясений в Турции в феврале 2023 г., некоторые из которых были обнаружены с использованием различных подходов, а именно:

– максимальные аномалии, проявившиеся 18, 21, 23 и 24 января 2023 г. (за 19, 16, 14 и 13 дней до первого землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г.);

– минимальные аномалии, проявившиеся с 29 января по 3 февраля 2023 г. (за 8–3 дня до первого землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г.).

Необходимо также отметить, что в целом наблюдалось повышение относительных значений полного электронного содержания ионосферы за 19 дней до главного землетрясения с $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г., а затем выявлено снижение значений TЕС при приближении к дате землетрясения (минимальное значение регистрировалось за 3 дня до этого сейсмического события) и резкое повышение его значений в день начала серии сильных землетрясений в Турции.

Выявленное в нашем исследовании падение значений ионосферных параметров, происходившее за 3 дня до начала серии землетрясений в Турции, совпадает с результатами исследования ионосферы для этого же землетрясения, описан-

ными в работе (Akhoondzadeh, Marchetti, 2023). Аналогичные результаты (рост значений параметров ионосферы за 13–16 дней, их падение за 1–8 дней до землетрясений, а также резкий рост в дни землетрясений) были получены нами ранее, например, (Бондур, Смирнов, 2005) или при исследованиях землетрясений в Италии (Бондур и др., 2021), Калифорнии (Бондур и др., 2020), в районе оз. Байкал (Бондур и др., 2022). Возможность использования данных TEC GIM и частота появления аномалий в ионосфере на финальной стадии подготовки землетрясений подтверждена также в работе (Zhu, Jiang, 2020).

Совместный анализ аномалий различных геофизических полей. Для выявления взаимосвязей между появлением аномальных изменений параметров различных геофизических полей при подготовке землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., был проведен их совместный анализ.

На рис. 7 приведены графики изменений нормализованного индекса полного электронного содержания ионосферы (NTEC) (рис. 7, а), среднесуточных значений аэрозольной оптической толщины (AOD) (рис. 7, б), нормализованных индексов температуры земной поверхности (SST), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительной влажности (RHS) (рис. 7, в), а также графики изменений суммарных длин линий разных направлений (рис. 7, г).

Из анализа рис. 7 следует, что первые изменения анализируемых параметров геофизических полей в период подготовки серии землетрясений в Турции, произошедших в феврале 2023 г., были зафиксированы 3 января 2023 г. (за 34 дня до землетрясения). Они проявлялись в виде аномального падения нормализованных значений относительной влажности (до величины $N_i = -0.84$). Затем в течение последующих 5 дней (с 3 до 8 января 2023 г.) наблюдался интенсивный рост нормализованных значений этого параметра до максимальной величины ($N_i = 1.1$), достигнувшей 8 января 2023 г. (см. рис. 7, в).

Впоследствии 12 января 2023 г. (за 25 дней до главного сейсмического события с $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г., а также за 3 дня до землетрясения с $M = 4.7$, произошедшего 15 января 2023 г.) наблюдалось падение нормализованных значений относительной влажности, достигших минимума ($N_i = -0.15$). Анализ рис. 7, в показал, что в этот же день 12 января 2023 г. был выявлен также минимум нормализованного индекса уходящего длинноволнового излучения ($N_i = -0.9$). Описанные аномалии, выявленные по спутниковым данным в период с 3 по 12 января 2023 г., могут быть также связаны с землетрясением, которое произошло 15 января 2023 г. ($M = 4.7$), а

также с подготовкой разрушительного землетрясения, произошедшего 6 февраля 2023 г. с $M = 7.8$.

Из анализа рис. 7 следует, что 15 января 2023 г. было зарегистрировано повышение значений нормализованного индекса полного электронного содержания NTEC в 15 ч. местного времени (см. рис. 7, а), аэрозольной оптической толщины (см. рис. 7, б), нормализованных индексов OLR и RHS (см. рис. 7, в). В этот день было зарегистрировано землетрясение с магнитудой $M = 4.7$. Однако однозначно связать повышение значений NTEC с этим землетрясением достаточно сложно, т.к. в этот день наблюдались возмущения геомагнитного поля (индекс *Dst* достигал значения -58 нТл), а значения AOD не являлись надежными из-за наличия облачности (см. рис. 4 и его описание).

Анализ рис. 7, в показал, что с 12 по 20 января 2023 г. наблюдался рост уходящего длинноволнового излучения (OLR) до аномально высоких значений этого параметра, составляющих величину $N_i = 1.1$, которые, сохранились вплоть до 27 января 2023 г.

Из анализа рис. 7, а следует, что максимальные значения нормализованного индекса полного электронного содержания (NTEC) были зарегистрированы 18, 21, 23 и 24 января 2023 г. (за 19, 16, 14 и 13 дней до главного землетрясения). При этом, как видно из рис. рис. 7, в, 19 января 2023 г. (т.е. за 18 дней до главного землетрясения с $M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г.) были выявлены повышенные значения температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), а с 20 января 2023 г. (см. рис. 7, б) начинался интенсивный рост значений аэрозольной оптической плотности (AOD), который 28 января 2023 г. достиг максимума (0.39), превышающего уровень в 3 стандартных отклонения от среднегодового значения.

Из анализа рис. 7, в следует, что 12 января 2023 г. (за 25 дней до главного сейсмического события) выявлены аномально низкие значения нормализованного индекса ($N_i = -0.9$) для уходящего длинноволнового излучения (OLR), а затем в течение 8 последующих дней происходил их рост. Аномально повышенные значения (OLR) сохранились с 19 до 27 января 2023 г. (до $N_i = 1.1$). За 9 дней до главного землетрясения (28 января 2023 г.) наблюдалось резкое падение нормализованных значений OLR (до $N_i = -1.1$) вплоть до 6 февраля 2023 г., а 29 января 2023 г. (за 8 дней до землетрясения с $M = 7.8$) было зарегистрировано понижение нормализованных значений относительной влажности (см. рис. 7, в).

Анализ рис. 7, в показал, что, начиная с 29 января 2023 г. (т.е. за 8 дней до главного сейсмического толчка) значения нормализованных индексов SST и SAT постепенно понижались по мере

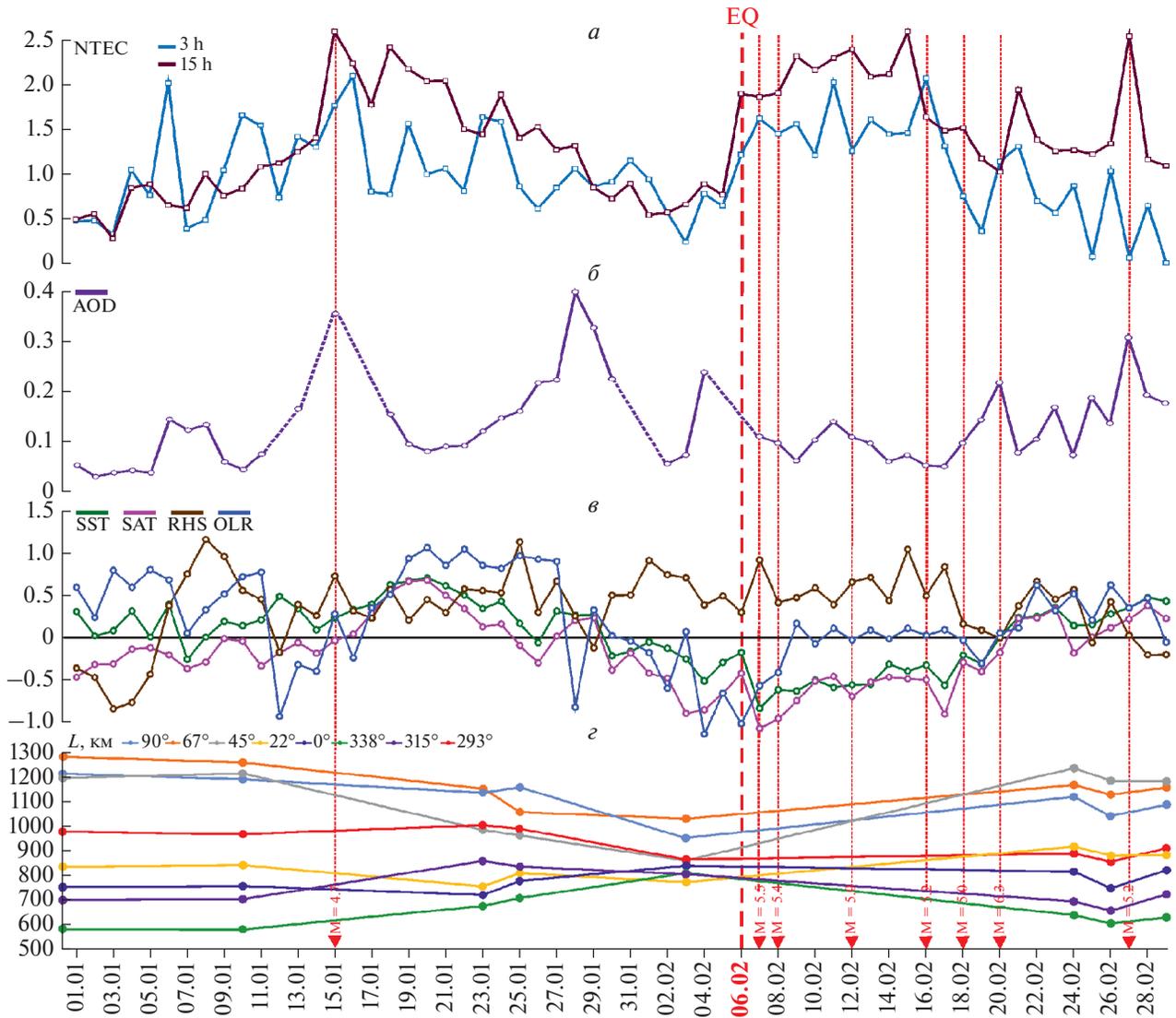


Рис. 7. Графики изменений: *a* – нормализованного индекса полного электронного содержания ионосферы (NTEC); *б* – аэрозольной оптической толщины (AOD); *в* – нормализованных индексов температуры поверхности (SST), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR), влажности (RHS); *г* – суммарных длин линейментов разных направлений.

приближения к дате начала серии разрушительных землетрясений (6 февраля 2023 г.), а значения относительной влажности (RHS) наоборот повышались. При этом аномально высокие нормализованные значения RHS (до $N_i = 1$) сохранились вплоть до 27 февраля 2023 г., что может быть связано с повышенной афтершоковой активностью в исследуемом регионе.

Следует также отметить, что анализ изменений суммарных длин линейментов разных направлений, осредненных по каждому из восьми направлений (через 22.5°), показал, что преобладающими направлениями линейментов являлись $L 67^\circ$, $L 90^\circ$, $L 45^\circ$ (см. рис. 7, г), которые совпадали с простиранием основных морфоструктур.

При приближении к моменту землетрясения с $M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г., для направлений, согласных с простиранием Восточно-Анатолийского разлома, была характерна общая тенденция уменьшения суммарных длин линейментов и постепенное их увеличение после землетрясения (см. рис. 7, г). Для остальных направлений ($L 293^\circ$, $L 22^\circ$, $L 0^\circ$, $L 315^\circ$, $L 338^\circ$), поперечных к основным морфоструктурам данного участка происходила обратная картина, при которой была характерна общая тенденция увеличения суммарных длин штрихов к моменту землетрясения, а также их уменьшения после этого сейсмического события (см. рис. 7, г). Таким образом, за 3 дня (3 февраля 2023 г.) до первого толчка с магнитудой

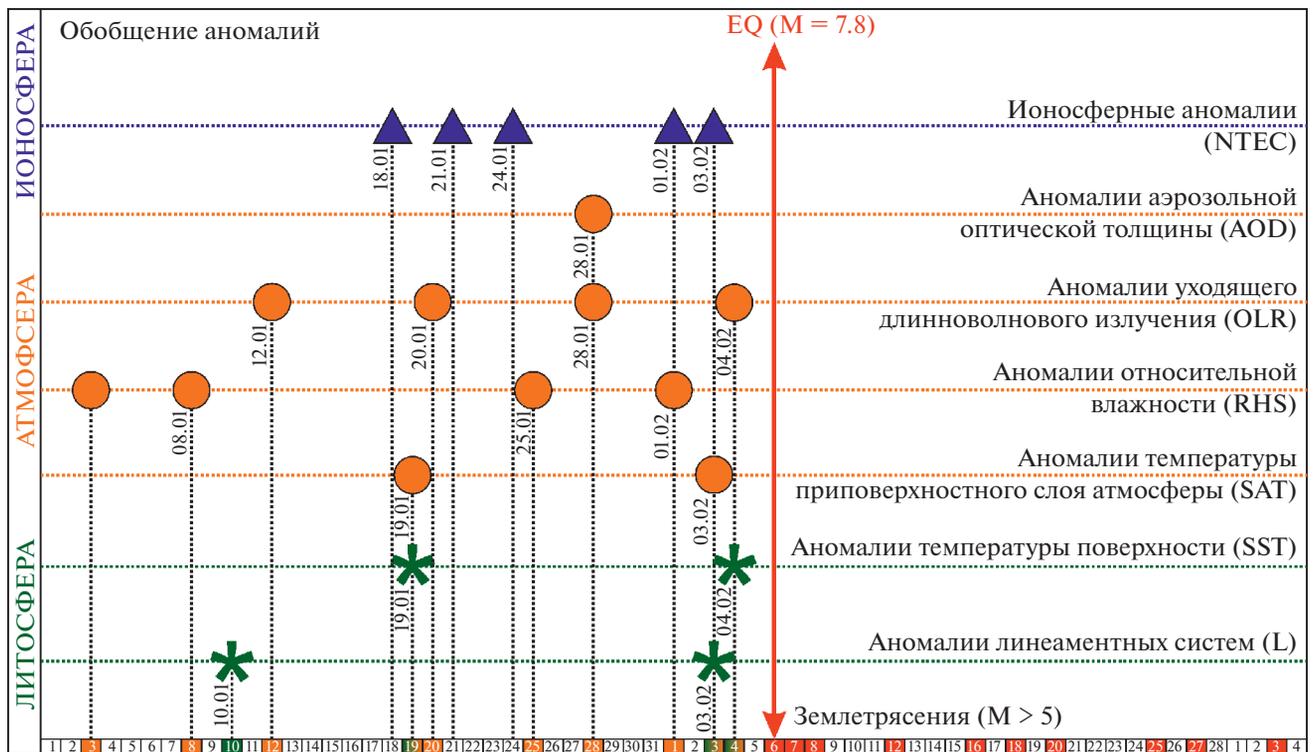


Рис. 8. Обобщенная диаграмма появления аномалий параметров анализируемых геофизических полей при подготовке землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г.

$M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г., выявлено увеличение текущих направлений на схемах роз-диаграмм региональных линейментов, а также на графике суммарных длин штрихов (рис. 7, з).

Из анализа рис. 7, а, 7, б, 7, в следует, что за 3 дня (3 февраля 2023 г.) до первого разрушительного землетрясения (6 февраля 2023 г.) было зарегистрировано также падение нормализованных значений приповерхностной температуры SAT, аэрозольной оптической толщины AOD и нормализованных значений полного электронного содержания ионосферы (NTEC).

Необходимо отметить, что в период с 20 января по 3 февраля 2023 г. по мере приближения к началу серии разрушительных землетрясений на территории Турции наблюдалось общее снижение нормализованных значений полного электронного содержания ионосферы (NTEC), температур поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и значений аэрозольной оптической толщины (AOD) (см. рис. 7, а, 7, б, 7, в).

После начала серии землетрясений с 6 по 13 февраля 2023 г. было зарегистрировано резкое возрастание значений NTEC (см. рис. 7, а) и снижение значений AOD (см. рис. 7, б).

Из рис. 7 следует, что в период с 6 февраля по 1 марта 2023 г. были зарегистрированы периоды

резкого снижения и повышения значений исследуемых параметров, однако из-за сложной сейсмической обстановки достаточно сложно проводить их совместный анализ. Это может быть предметом дальнейших исследований.

На рис. 8 представлена обобщенная диаграмма появления аномалий параметров различных геофизических полей при подготовке серии землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., в период с 1 января по 6 февраля 2023 г., который позволил выявить некоторые связи в появлении этих аномалий.

Из анализа рис. 8 следует, что первые аномалии были зарегистрированы в атмосфере за 34–29 дней до начала серии разрушительных землетрясений в Турции (6 февраля 2023 г.), которые проявились в виде снижения (3 января 2023 г.) и повышения (8 января 2023 г.) относительной влажности воздуха (см. рис. 3, а также рис. 7, в). Они предшествовали формированию аномалий уходящего длинноволнового излучения, которые возникли 12 января 2023 г. и проявлялись в резком снижении значений OLR (до 173 Вт/м^2), которые выходили за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$ (см. рис. 3, 7, в). Подобные явления были описаны и в работе (Ruzmaikin et al., 2014).

За 27 дней до главного сейсмического события (10 января 2023 г.) были выявлены первые анома-

лии линеаментных систем, которые проявлялись в увеличении плотности локальных линеаментов (штрихов) (см. рис. 2, 8).

15 января 2023 г. на исследуемой территории произошло землетрясение $M = 4.7$, поэтому аномалии, которые проявлялись в изменении относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения и характеристик линеаментных систем, зарегистрированные в период с 3 по 12 января 2023 г. могут быть связаны с этим землетрясением.

Начиная с 18 января 2023 г. (т.е. за 19 дней до землетрясения с $M = 7.8$), регистрировались аномалии характеристик всех исследуемых геофизических полей (см. рис. 8), которые активизировали цепочку процессов, предшествовавших серии сильных землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г.

Анализ рис. 8 показал, что 25 и 27 января 2023 г. были зарегистрированы аномалии относительной влажности и с задержкой в несколько дней аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения. Аномалии проявлялись в повышении нормализованных значений относительной влажности (RHS) и резком понижении нормализованного индекса уходящего длинноволнового излучения (OLR) (см. рис. 7, в). Аналогичные результаты описаны в статье (Ruzmaikin et al., 2014). Кроме того, 28 января 2023 г. была зарегистрирована также аномалия аэрозольной оптической толщины, которая проявлялась в резком повышении значения этого параметра (см. рис. 4, б, 7, б, 8).

В период времени с 1 по 4 февраля 2023 г. были выявлены наиболее явные аномальные изменения линеаментных систем (см. рис. 2, 7, в и 8). В этот же период времени были зарегистрированы ионосферные аномалии, аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения, а также аномальные значения относительной влажности и температуры приповерхностного слоя атмосферы (см. рис. 3, 7, в и 8). Подобные изменения температур и влажности во время нескольких сильных землетрясений в Мексике были исследованы, например, в работе (Pulinets et al., 2006), где подтвердилась возможность использования данных параметров в качестве индикаторов предстоящей сейсмической активности.

Таким образом, совместный анализ изменений линеаментных систем, аномалий температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения, аэрозольной оптической толщины и полного электрического содержания ионосферы позволил выявить возможную последовательность появления предвестниковых аномалий в параметрах исследуемых геофизических полей при подготовке серии разрушительных

землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием космических данных исследованы вариации параметров различных геофизических полей, проявившиеся в литосфере, атмосфере и ионосфере в период подготовки и протекания разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., в том числе катастрофического сейсмического события, состоявшегося 6 февраля 2023 г. с максимальной магнитудой $M = 7.8$.

При обработке космических изображений выявлены пространственно-временные вариации линеаментных систем, вызванные этими землетрясениями, проявившиеся в увеличении их плотности, которые начались за 27 дней до землетрясения, произошедшего 6 февраля 2023 г., изменение ориентации линий вытянутости, которые начинали перестраиваться за 14 дней до этого землетрясения, а также рост секущих направлений на роз-диаграммах линеаментов, начинающих проявляться за 27 дней до этого сейсмического события и достигавших максимального значения за 3 дня до него.

Анализ изменений параметров тепловых полей в период подготовки сильных землетрясений, произошедших на территории Турции, начиная с 6 февраля 2023 г., позволил выявить повышение значений температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы (на $3-6^{\circ}\text{C}$) по сравнению со средними значениями за период времени с 2004 по 2022 гг., которые проявлялись за 18 дней до главного сейсмического толчка, а также резкие понижения температур (на $6-8^{\circ}\text{C}$), проявившиеся за 3-6 дней до этого землетрясения.

Установлено, что аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения, зарегистрированные из космоса в период подготовки сильных землетрясений в Турции, проявлялись в падении (на 20%) значений этого параметра, происходившем за 25 дней до главного сейсмического события, а также последующем его росте до значения, превышавшего среднее многолетнее значение на величину 79 Вт/м^2 , проявившееся за 16 дней до землетрясения, а также в аномально низких значениях уходящего длинноволнового излучения (в 2.2 раза ниже средних значений за прошлые годы (2004-2022 гг.), которые были обнаружены за 2 дня до землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 г.

Период подготовки землетрясения в Турции, состоявшегося 6 февраля 2023 г. сопровождался также повышением значений относительной влажности, максимум которых был зафиксирован за 29 дней до главного толчка, а также анома-

лией аэрозольной оптической плотности, обнаруженной по спутниковым данным за 7 дней до землетрясения, состоявшегося 6 февраля 2023 г., которая проявлялась в повышении значения этого параметра в 2.35 раза по сравнению со средним значением за 2022 г.

На основании результатов исследования вариаций ионосферной плазмы при подготовке серии разрушительных землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г. установлено, что в целом происходило повышение относительных значений полного электронного содержания ионосферы за 19 дней до главного землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, а затем снижение значений этого параметра за 3–13 дней до этого сейсмического события и резкое повышение его значений в день начала серии сильных землетрясений.

Совместный анализ результатов проведенных исследований позволил выявить временные последовательности появления аномалий параметров различных геофизических полей (линеаментных систем, температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, относительной влажности, аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы) в процессе подготовки серии разрушительных землетрясений на территории Турции в феврале 2023 г. В исследуемый период можно выделить три основных временных промежутка появления аномалий: первый – за 34–25 дней до землетрясений (для систем линеаментов, уходящего длинноволнового излучения и относительной влажности); второй – за 19–9 дней до землетрясений (для температуры земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения, аэрозольной оптической толщины, полного электронного содержания ионосферы); третий – за период от 5 до 2 дней до землетрясений (для систем линеаментов, температуры земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, относительной влажности, полного электронного содержания ионосферы).

Кроме этого установлено, что происходило общее снижение нормализованных значений; полного электронного содержания ионосферы (за 19 дней–3 дня), температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы (за 17 дней–3 дня), уходящего длинноволнового излучения (за 10 дней–2 дня), а также значений аэрозольной оптической толщины (за 9 дней–2 дня) до начала разрушительных землетрясений на территории Турции, происходивших 6 февраля 2023 г.

Выполненные исследования продемонстрировали, что для лучшего понимания процессов,

связанных с подготовкой и протеканием землетрясений, перспективно проведение совместного анализа параметров различных геофизических полей, регистрируемых из космоса при мониторинге сейсмоопасных территорий, которые могут использоваться в качестве краткосрочных предвестников значительных сейсмических событий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А.* Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Бондур В.Г., Воронова О.С.* Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ($M = 6.1$) и 24 января 2020 г. ($M = 6.7$) // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 6. С. 3–16.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- Бондур В.Г., Воронова О.С.* Регистрация из космоса аномальных вариаций тепловых полей при сейсмических событиях на территории Северного Кавказа с 2017 по 2022 гг. // *Исслед. Земли из космоса* 2022. № 6. С. 1–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422060021>
- Бондур В.Г., Гапонова Е.В.* Регистрация из космоса аномальных вариаций линеаментных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 г. // *Исслед. Земли из космоса*. 2021. № 2. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>
- 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 (а). № 1. С. 120–132.
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б.* Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2016 (б). Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* 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., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // *Исслед. Земли из космоса*. 2005. № 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. Предвестниково-изменчивость линеаментных систем, выявляемых по космическим изображениям, в период сильных землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2016 (в). № 3. С. 3–12.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416030027>
- 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. Совместный анализ аномальных вариаций различных геофизических полей по космическим данным при подготовке землетрясения в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. (M = 5.6) // Исслед. Земли из космоса, 2022. № 5. С. 1–18.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422050049>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Воронова О.С., Феоктистова Н.В. Исследование из космоса аномальных вариаций различных геофизических полей при подготовке серии сильных землетрясений в Италии в 2016–2017 гг. // Исслед. Земли из космоса, 2021(б). № 6. С. 1–20.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421060038>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 3–24.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018–2023 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 3. С. 3–12.
<https://doi.org/10.31857/S0205961423030090>
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 гг. на южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Докл. АН. 2021(а).
<https://doi.org/10.31857/S268673972108003X>
- Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) / А.А. Златопольский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 102–112.
- Киссин И.Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли, 2013. № 4. С. 145–160.
<https://doi.org/10.7868/S000233713040054>
- Короновский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н. Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.
- Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований. М.: Мир, 1988, 350 с.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н.М., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли, 2010. № 2. С. 3–16.
- Моги К. Предсказание землетрясений // М.: Мир. 1988. 382 с.
- МЧС России [Электронный ресурс], URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения 28 марта 2023).
- 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 аэрномия. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003, 270 с.
- Служба Срочных Донесений [Электронный ресурс], URL http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm (дата обращения 28 марта 2023).
- Трифонов В.Г. Труды геологического института. Вып. 614. Неотектоника подвижных поясов: Отв. ред. К.Е. Дегтярёв. М.: ГЕОС, 2017. 180 с.
- Akhoondzadeh M. Ant Colony Optimization detects anomalous aerosol variations associated with the Chile earthquake of 27 February 2010. *Advances in Space Research* 2015. V. 55. P. 1754–1763.
- Akhoondzadeh M., Marchetti D. Study of the Preparation Phase of Turkey’s Powerful Earthquake (6 February 2023) by a Geophysical MultiParametric Fuzzy Inference System. *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 2224.
<https://doi.org/10.3390/rs15092224>
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A. Revealing Short-Term Precursors of the Strong M > 7 Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Frontiers in Earth Science.* 2020. V. 8. P. 571700.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001. V. 39. P. 8–20.
<https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Ganguly N.D. Atmospheric changes observed during April 2015 Nepal earthquake // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2016. V. 140. P. 16–22.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.01.017>
- 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. 14 p.
- Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A. Geo-complexity and earthquake prediction // In: Meyers R. (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, 2009. P. 4178–4194.
- Lyapustin A., Wang Y. MCD19A2 MODIS/Terra + Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1 km SIN Grid V006 [Data set] // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC.* 2018. 19 p.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.006>
- Mehta A., Susskind J. Outgoing longwave radiation from the TOVS Pathfinder Path A data set // *J. Geophysical Re-*

- search: Atmospheres. 1999. V. 104. № D10, P. 12193–12212. <https://doi.org/10.1029/1999jd900059>
- Molchan G., Keilis-Borok V. Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect. Geophys. J. Int. 2008. V. 173. P. 1012–1017.
- Noll C. The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, Advances in Space Research, 2010. V. 45. № 12. P. 1421–1440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Okada Y., Mukai S., Singh R.P. Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001. Adv. Space Res. 2004. V. 33. № 3. P. 254–258. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00474-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00474-5)
- Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake. A Look from a 20-Year Perspective // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. J. Asian Earth Sci. 2011. V. 41. P. 371–382.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnykh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. Physics and Chemistry of the Earth, 2006. Parts A/B/C. V. 31. № 4–9. P. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Ruzmaikin A., Aumann H.H., Manning E.M. Relative Humidity in the Troposphere with AIRS // J. Atmospheric Sciences. 2014. V. 71. № 7. P. 2516–2533. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0363.1>
- Soujan Ghosh, Sudipta Sasmal, Manish Naja, Stelios Potirakis, Masashi Hayakawa. Study of aerosol anomaly associated with large earthquakes ($M > 6$), Advances in Space Research. 2023. V. 71. № 1. P. 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.051>
- Tronin A.A. Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // Remote Sensing, 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.
- Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y. Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Zhang L., Dai K., Deng, J. Ge D., Liang R., Li W., Xu Q. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // Remote Sensing. 2021. V. 13. P. 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>
- Dal Zilio L., Ampuero J.P. Earthquake doublet in Turkey and Syria. Commun Earth Environ 2023. V. 4. P. 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- Zhu F., Jiang Y., Investigation of GIM-TEC disturbances before $M \geq 6.0$ inland earthquakes during 2003–2017. Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 18038. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74995-w>

Satellite Registration of Anomalies of Various Geophysical Fields during the Preparation of Destructive Earthquakes in Turkey in February 2023

V. G. Bondur¹, M. N. Tsidilina¹, E. V. Gaponova¹, O. S. Voronova¹, M. V. Gaponova¹, N. V. Feoktistova¹, and A. L. Zima¹

¹Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow, Russia

Studies of variations in the parameters of various geophysical fields were carried out using satellite data during the preparation of destructive earthquakes with magnitudes of $6 \leq M \leq 7.8$ that occurred in Turkey in February 2023. It was found that the anomalies of these parameters manifested themselves from 34 to 25 days before the earthquakes as a sharp decrease in the values of relative humidity and outgoing longwave radiation, as well as in an increase in the density of local lineaments. An increase in surface skin temperature, surface air temperature, relative humidity, outgoing longwave radiation, as well as in the values of the aerosol optical depth and ionospheric total electron content was revealed 19–9 days before the analyzed seismic events. 5–2 days before these earthquakes, a decrease in the surface skin temperature, surface air temperature, the flux of outgoing longwave radiation, the ionospheric total electron content, as well as an increase in relative humidity and in the length of the secants of the rose diagrams of regional lineaments were recorded. Quantitative characteristics of these anomalies were identified.

Keywords: satellite imagery, remote sensing, earthquakes, seismic danger areas, geodynamics, lineaments, thermal fields, ionosphere

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. <https://doi.org/10.1134/S1069351317010025>
- Bondur V.G., Voronova O.S. Study of Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey on March 8, 2010 ($M = 6.1$), and January 24, 2020 ($M = 6.7$). Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2021. V. 57. P. 991–1002. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>
- Bondur V.G., Voronova O.S. Detection from Space of Anomalous Variations in Thermal Fields during Seismic Events in the Northern Caucasus in 2017–2022. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. P. 1546–1556. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120064>

- Bondur V.G., Gaponova E.V.* Remotely Registering Anomalous Variations in Lineament Systems of the Baikal Rift Zone during the M = 5.6 Earthquake of September 21, 2020 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 1012–1020.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821090437>
- 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 (a). V. 52. № 1. P. 117–128.
<https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>
- 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 (b). V. 466. № 2. P. 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>
- 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.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X10010320>
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.
- 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., 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>
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh 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., 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., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Combined Analysis of Anomalous Variations in Various Geophysical Fields during Preparation of the M5.6 Earthquake near Lake Baikal on September 22, 2020, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, V. 58. № 12. P. 1532–1545.
<https://doi.org/10.1134/S0001433822120052>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Voronova O.S., Feoktistova N.V.* A Study from Space of Anomalous Variations of Various Geophysical Fields during the Preparation of a Series of Strong Earthquakes in Italy in 2016–2017 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 12. P. 1590–1606.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821120057>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Joint Analysis of Anomalies of Different Geophysical Fields, Recorded from Space during Precursors of Strong Earthquakes in California // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 12. P. 1502–1519.
<https://doi.org/10.1134/S000143382012035X>
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V.* Anomalous Geodynamics before the 2023 Earthquake in Turkey According to Radar Interferometry 2018–2023 // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2023. № 3. P. 3–12. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961423030090>
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov T.A. et al.* Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 near Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry. *Dokl. Earth Sc.* 2021(a). V. 499. P. 648–653.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21080031>
- Zlatopolskiy A.A.* Metodika izmereniya oriyentatsionnykh kharakteristik dannykh distantsionnogo zondirovaniya (tekhnologiya LESSA) [Technique for measuring orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology)] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. Iss. 5. V. 1. P. 102–112. (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.
<https://doi.org/10.1134/S1069351313040058>
- Koronovskiy N.V., Zlatopol'skiy A.A., Ivanchenko G.N.* (1986) Avtomatizirovannoye deshifirovaniye kosmicheskikh snimkov s tsel'yu strukturnogo analiza // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 1986. № 1. P. 111–118. (In Russian).
- Kronberg P.* Distantsionnoye izucheniye Zemli: osnovy i metody distantsionnykh issledovaniy. M.: Mir, 1988, 350 p. (In Russian).
- Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Polyakov S.A., Diamant M., Shapiro N.* Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of ALTAI (CHUIA) earthquake of September 27, 2003 // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. V. 46. № 2. P. 91–103.
- Mogi K.* Earthquake Prediction. Academic Press, Tokyo, 1985. 355 p.
- Molchan G., Keilis-Borok V.* Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect. *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173. P. 1012–1017.
- EMERCOM of Russia, available at:
<https://en.mchs.gov.ru/> (accessed: March 28, 2023).
- 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.
<https://doi.org/10.1134/S0016793210020118>
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseny i predvestniki (Earthquake physics and precursors). Moscow: Nauka, 2003. P. 270 p. (In Russian).
- FRC RAS Geophysical survey, available at:
http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm (accessed: March 28, 2023).
- Trifonov V.G.* Transactions of the Geological Institute. V. 614: Neotectonics of Mobile Belts / Ed. by K.E. Degtyarev. Moscow: GEOS, 2017. 180 p.
- Akhoondzadeh M.* Ant Colony Optimization detects anomalous aerosol variations associated with the Chile earth-

- quake of 27 February 2010. *Advances in Space Research* 2015. V. 55. P. 1754–1763.
- Akhoondzadeh M., Marchetti D.* Study of the Preparation Phase of Turkey's Powerful Earthquake (6 February 2023) by a Geophysical MultiParametric Fuzzy Inference System. *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 2224. <https://doi.org/10.3390/rs15092224>
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.* Revealing Short-Term Precursors of the Strong $M > 7$ Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Frontiers in Earth Science.* 2020. V. 8. P. 571700. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* V. 39. 2001. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Ganguly N.D.* 2016. Atmospheric changes observed during April 2015 Nepal earthquake. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 140. P. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.01.017>
- 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. 14 p.
- Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A.* Geo-complexity and earthquake prediction. In: Meyers R. (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, 2009. P. 4178–4194.
- Lyapustin A., Wang Y.* MCD19A2 MODIS/Terra + Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1 km SIN Grid V006 [Data set] // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC.* 2018. 19 p. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.006>
- Mehta A., Susskind J.* Outgoing longwave radiation from the TOVS Pathfinder Path A data set // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 1999. V. 104. № D10. P. 12193–12212. <https://doi.org/10.1029/1999jd900059>
- Noll C.* The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, *Advances in Space Research*, 2010. V. 45. № 12. P. 1421–1440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Okada Y., Mukai S., Singh R.P.* Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001. *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. № 3. P. 254–258. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00474-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00474-5)
- Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D.* From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake. A Look from a 20-Year Perspective // *Atmosphere.* 2021. V. 12. P. 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>
- Pulinets S.A., Ouzounov D.*, Lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. *J. Asian Earth Sci.* 2011. V. 41. P. 371–382.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnykh L.A.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006. Parts A/B/C, V. 31. № 4–9. P. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Ruzmaikin A., Aumann H.H., Manning E.M.* Relative Humidity in the Troposphere with AIRS. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014. V. 71. № 7. P. 2516–2533. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0363.1>
- Soujan Ghosh, Sudipta Sasmal, Manish Naja, Stelios Potirakis, Masashi Hayakawa.* Study of aerosol anomaly associated with large earthquakes ($M > 6$), *Advances in Space Research.* 2023. V. 71. № 1. P. 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.051>
- Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // *Remote Sensing*, 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.
- Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y.* Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. P. 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Zhang L., Dai K., Deng J., Ge D., Liang R., Li W., Xu Q.* Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // *Remote Sensing.* 2021. V. 13. P. 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>
- Dal Zilio L., Ampuero J.P.* Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Commun Earth Environ.* 2023. V. 4. P. 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- Zhu F., Jiang Y.* Investigation of GIM-TEC disturbances before $M \geq 6.0$ inland earthquakes during 2003–2017. *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. 18038. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74995-w>