

А. А. Ковалев^{1}, А. Ю. Белинская¹, Н. Н. Семаков¹*

Предварительный анализ вариаций ионосферных и магнитных параметров, сопутствующих землетрясениям в феврале 2023 г. в Турции

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: KovalevAA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вариации ионосферных и магнитных параметров, сопутствующих землетрясениям в феврале 2023 года в Турции. Для исследования привлечены данные шести ионосферных станций, четыре из которых расположены в области подготовки землетрясения, а 2 других на той же широте, но вне ее. Для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений анализировались отклонения критической частоты слоя F2 от 15-дневных скользящих. Установлено, что для зоны подготовки землетрясения наблюдались большие отрицательные отклонения в течение 10 дней до первого сильного толчка, который произошел 06.02.2023г. в 1:17UT. 37,23°с.ш. 37,02°в.д. с магнитудой 7,8. После события виден ночной «всплеск» критической частоты, что соответствует значительному увеличению электронной концентрации ионосферы. Кроме того, рассмотрено формирование над зоной подготовки землетрясения аномальных спорадических слоев Es с критической частотой больше 5 МГц. Выявлено, что в дни до землетрясения на всех станциях формировался долгоживущий Es-слой в полночное время, что не характерно для такого образования ионосферы, особенно в зимний период. Выполнен анализ данных пяти магнитных станций, попавших в зону подготовки землетрясения. По минутным данным проанализирована корреляция значений локальной магнитной постоянной с 23 января по 23 февраля 2023 года. Выявлен рост этих корреляций в полумесячный период после 6 февраля по сравнению с полумесячным периодом, предшествующим землетрясению. Полученные результаты будут использованы для проведения комплексного исследования по поиску предвестников землетрясений по геофизическим наблюдениям, а также уточнения возможных механизмов их возникновения.

Ключевые слова: ионосфера, геомагнитное поле, землетрясение, локальная магнитная постоянная

A. A. Kovalev^{1}, A. Yu. Belinskaya¹, N. N. Semakov¹*

Ionospheric and magnetic parameters variations preliminary analysis accompanying the earthquakes in Turkey in February 2023

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: KovalevAA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The work deals with variations in ionospheric and magnetic parameters accompanying earthquakes in Turkey in February 2023. Data from six ionospheric stations were used for the study, 4 of which are located in the earthquake preparation area, and 2 others at the same latitude, but outside it. To detect ionospheric precursors of earthquakes, deviations of the critical frequency of the F2 layer from the 15-day sliding ones were analyzed. It was found that large negative deviations were observed for the earthquake preparation zone for 10 days before the first strong shock, which occurred on

06.02.2023 at 1:17UT. 37.23N 37.02E with a magnitude of 7.8. And after the event, a nighttime "surge" of critical frequency is visible, which corresponds to a significant increase in the electron concentration of the ionosphere. In addition, the formation of anomalous sporadic Es layers with a critical frequency greater than 5 MHz above the earthquake preparation zone is considered. It was revealed that in the days before the earthquake, a long-lived Es layer was formed at all stations at midnight, which is not typical for such ionospheric formation, especially in the winter period. The data analysis of 4 magnetic stations that fell into the earthquake preparation zone was performed. According to minute data, the correlation of the values of the local magnetic constant from January 23 to February 23, 2023 was analyzed. The growth of these correlations was revealed in the half-month period after February 6 compared with the half-month period preceding the earthquake. The results obtained will be used to conduct a comprehensive study on the search for earthquake precursors based on geophysical observations, as well as to clarify the possible mechanisms of their occurrence.

Keywords: ionosphere, geomagnetic field, earthquake, local magnetic constant.

Введение

Для предварительного анализ вариаций ионосферных и магнитных параметров, сопутствующих землетрясениям в феврале 2023 года в Турции, нами были привлечены данные, полученные на следующих сайтах:

- по параметрам землетрясений *U.S. Geological Survey* (<https://earthquake.usgs.gov>), на рис. 1 эпицентры землетрясений с магнитудой больше 5 обозначены фиолетовыми значками;
- по ионосфере *GIRO* (<http://spase.info/SMWG/Observatory/GIRO>) [1], на рис. 1 ионосферные станции отмечены красными значками;
- по геомагнитному полю *INTERMAGNET* (<http://www.intermagnet.org>), на рис. 1 магнитные станции обозначены зелеными значками.



Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений (фиолетовые значки), ионосферных (красные значки) и магнитных (зеленые значки) станций

Зоной подготовки землетрясения принято считать область, определяемую радиусом Добровольского $R_d=10^{0,43M}$, где R_d — радиус зоны подготовки (км), M — магнитуда землетрясения [2].

Ионосфера Земли может служить индикатором различных процессов в системе геосфер. Модель литосфера-атмосфера-ионосфера *LAIC (Lithosphere, Atmosphere, Ionosphere, Coupling)* описывает, как атмосфера и ионосфера реагируют на процессы землетрясений в течение периода времени (до двух недель) до того, как произойдет землетрясение [3]. Для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений проводится анализ данных по критической частоте слоя $F2 - foF2$, т.к. она непосредственно связана с концентрацией электронов на высоте главного максимума ионосферы. Визуальное представление массивов суточных отклонений от текущего среднего значения за 15 дней называют «маской землетрясения», по ней судят о времени (часы LT и сутки до основного толчка) появления аномалий [4, 5]. Кроме того, одним из признаков готовящегося землетрясения является формирование над зоной подготовки землетрясения аномальных спорадических слоев, отличающихся от стандартных, прежде всего своей высокой электронной концентрацией и высотой расположения (аномальные спорадические слои образуются на высоте 120 км) [6]. В данной работе приводится предварительный анализ ионосферных характеристик как для станций, оказавшихся в зоне подготовки землетрясения, так и вне ее.

Как известно, землетрясения могут оказывать влияние на вариации геомагнитного поля. Есть свидетельства о заметном росте магнитных флуктуаций по (Z) компоненте в 12-часовом интервале, предшествующем землетрясению [7]. В работе [8] предполагается, что сейсмические и акустико-гравитационные волны могут вызвать модуляцию концентрации электронов, что в свою очередь повлечет вариации плотности ионосферных токов и, в конечном итоге, изменение уровня геомагнитного поля.

Основная цель данной работы – предварительный анализ данных для проведения комплексного исследования по поиску предвестников землетрясений по геофизическим наблюдениям, а также уточнение возможных механизмов их возникновения.

Вариации ионосферных параметров

Для анализа были использованы значения критических частот слоя $F2$ и E_s , полученные на обсерваториях вдоль $\sim 37^\circ$ с.ш., расположение первых четырех указано на рис. 1. А две других находятся вне области Добровольского ($R_d \sim 2260$ км). Подробная информация приведена в табл. 1.

Для каждой станции были рассчитаны и визуализированы «маски». По оси абсцисс откладывались дни (нулевой день – день землетрясения), а по оси ординат – истинное солнечное время (LT). Для вычисления $\Delta foF2$ используется скользящее среднее значение $foF2$ за предыдущие 15 суток.

Ионосферные станции

Код станции	Название станции	Широта °с.ш.	Долгота °в.д.	R_z км	$LT=UT+$
<i>NI135</i>	<i>NICOSIA</i>	35,03	33,16	422	2
<i>AT138</i>	<i>ATHENS</i>	38,00	23,50	1195	1,5
<i>VT139</i>	<i>SAN VITO</i>	40,60	17,80	1704	1
<i>GM037</i>	<i>GIBILMANNA</i>	37,9	14,00	2027	1
<i>EA036</i>	<i>EL ARENOSILLO</i>	37,10	353,30	3841	-0,5
<i>BC840</i>	<i>BOULDER</i>	40,00	254,70	10612	-7

R_z - расстояние от станции до эпицентра землетрясения 06.02.2023 37,23° с.ш. 37,02° в.д., $M 7,8$

На рис. 2 изображены «маски», построенные для самой ближайшей точки наблюдения за ионосферой (код *NI135*) и самой удаленной (код *BC840*). Видно, что отклонения от скользящего среднего ведут себя по-разному, причем стоит обратить внимание на то, что для зоны подготовки землетрясения наблюдались большие отрицательные отклонения в течение 10 дней до первого сильного толчка. А после события виден ночной «всплеск» критической частоты, что соответствует значительному увеличению электронной концентрации ионосферы. Причем для станций в области с радиусом Добровольского вариации аналогичны.

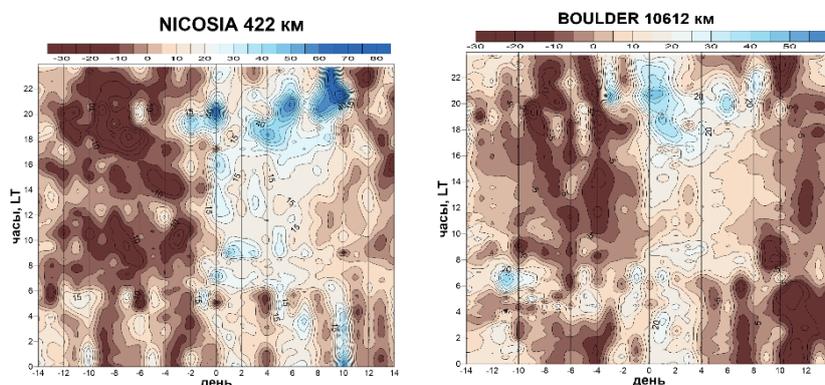


Рис. 2. Визуализация «маски землетрясения» для станции а) код *NI135* и б) код *BC840*

Для станций, попадающих в зону подготовки землетрясения, было рассмотрено формирование спорадических слоев. На рис. 3 представлены времена появления слоев E_s критической частотой больше 5 МГц (то есть слоя с высокой электронной концентрацией). Оси аналогично рис. 2. Размер и цвет символов соответствуют критической частоте (f_oE_s) и высоте ($h'E_s$), на которой он наблюдался. Первое, что надо отметить – в дни до землетрясения на всех станциях формиро-

вался долгоживущий E_s -слой в полночное время, что не характерно для такого образования ионосферы, особенно в зимний период [9]. Второе – минимальная высота спорадического слоя с высокой электронной концентрацией находилась не выше 100 км. После серии землетрясений с меньшими магнитудами и удалением от самого сильного толчка 06.02.2023 на восток, уже не наблюдаются долгоживущие спорадические слои в районе полночи, но сохраняются ночные спорадические слои с высокой электронной концентрацией.

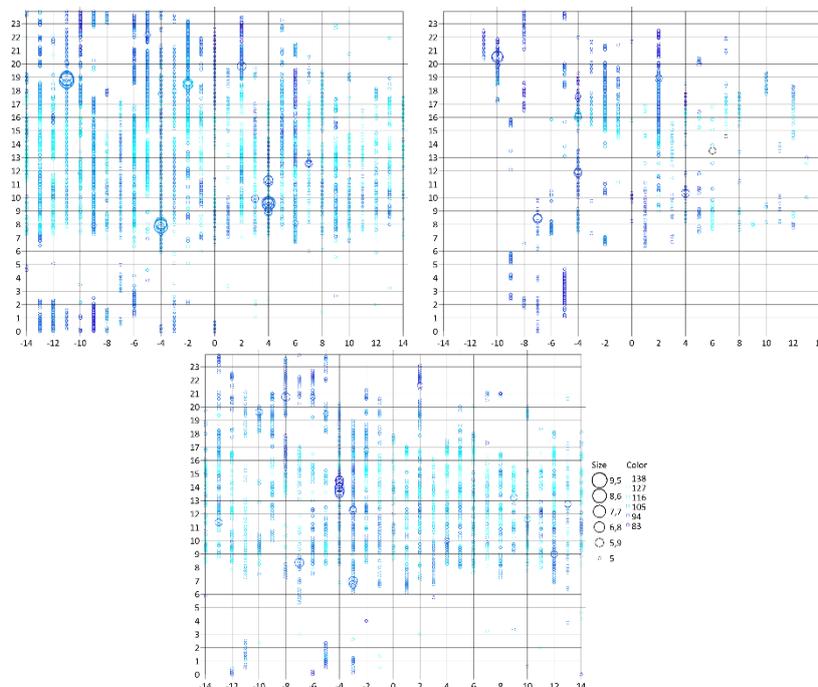


Рис. 3. Характеристики спорадического слоя E_s для станций, попадающих в зону подготовки землетрясения: а) код NI135, б) код BC840 и в) VT139. $Size$ – $foEs$ (МГц), а $Color$ – $h'Es$ (км)

В целом, для двух ионосферных слоев на станциях вдоль широты, на которой произошло землетрясение, есть явные отличия в изменениях их параметров над станциями в зоне его подготовки и вне ее. Таким образом, предварительный анализ вариаций параметров показывает, что необходимо продолжить детальный анализ всей толщи ионосферы, причем с привлечением данных с других станций, например, вдоль долготы, где было землетрясение, или в магнитосопряженных точках.

Вариации магнитного поля Земли

Выполнен анализ данных магнитных станций, попавших в зону подготовки землетрясения 06.02.2023 $37,23^\circ$ с.ш. $37,02^\circ$ в.д. с магнитудой 7,8 ($R_d \sim 2260$ км). Название станций, код, страна, географические координаты и расстояние до эпицентра землетрясения приведены в табл. 2, а расположение их приведено на рис. 1.

Магнитные станции

Название станции	код <i>IAGA</i>	Страна	Координаты °с.ш. °в.д.	R_z км
<i>Surlari</i>	<i>SUA</i>	Румыния	44,68 26,25	1243
<i>Panagjurishte</i>	<i>PAG</i>	Болгария	42,51 24,17	1260
<i>Pedeli</i>	<i>PEG</i>	Греция	38,10 23,90	1165
<i>Tihany</i>	<i>THY</i>	Венгрия	46,90 17,89	1907
<i>Hurbanovo</i>	<i>HRB</i>	Словакия	47,87 18,19	1950

R_z - расстояние от станции до эпицентра землетрясения 06.02.2023 37,23°с.ш. 37,02°в.д., М7,8

Основными характеристиками изменения главного магнитного поля Земли для каждого пункта наблюдения взяты минутные значения (Z) вертикальной и (H) горизонтальной компонент. Именно в (Z) компоненте наиболее заметны изменения литосферных источников магнитных вариаций [10].

Вычислены разности между смежными ежеминутными значениями (Z) и (H) компонент, что позволило подавить медленные тренды магнитного поля.

На рис. 4 (а, б) показан график модуля разности между смежными значениями (Z) и (H), соответственно, на магнитной станции *PAG*. По оси абсцисс откладывались дни (нулевой день – день землетрясения), а по оси ординат – время (UT). На рис. 4 (б) видно, что амплитуда модуля вариаций магнитного поля после землетрясения выше, чем до него.

На рис. 4 (в, г) показан график отклонений (Z) и (H) от текущего среднего значения за 15 дней, соответственно. Можно отметить, что эти компоненты ведут себя в противофазе. Примерно за четверо суток до землетрясения компонента (Z) имеет отрицательные отклонения, а на девятые сутки происходит рост отклонения.

По минутным данным корреляция значений локальной магнитной постоянной (G) с 23 января по 23 февраля 2023 года оказалась достаточно высокой не только для близкорасположенных друг к другу магнитных обсерваторий (*SUA-PEG*, 99,07%), но и для более удаленных (*PEG-THY*, 93,08%).

Но наибольший интерес, на наш взгляд, представляет рост этих корреляций в полумесячный период после 6 февраля по сравнению с полумесячным периодом, предшествующим землетрясению: для пары *SUA-PEG* с 98,32% до 99,26%, а для пары *PEG-THY* с 89,24% до 93,33%.

Изменение величины локальной магнитной постоянной (G) зависит как от изменения магнитного момента эквивалентного диполя, так и от изменения расстояния (R) между ним и обсерваторией, но не зависит от изменения ориентации этого диполя (ввиду чего эта характеристика магнитного поля и получила свое название). Вследствие этого, по изменению величины G можно оценить не только характер и масштаб изменения магнитного момента эквивалентного диполя (при фиксированном значении R), но и масштаб смещения эквивалентного

диполя относительно обсерватории (при фиксированном значении магнитного момента). Но в природе, скорее всего, происходит сочетание этих процессов: возможно одновременное изменение как энергии эквивалентной токовой системы, создающей магнитное поля Земли, так и изменение расстояния от этой токовой системы до точки наблюдения.

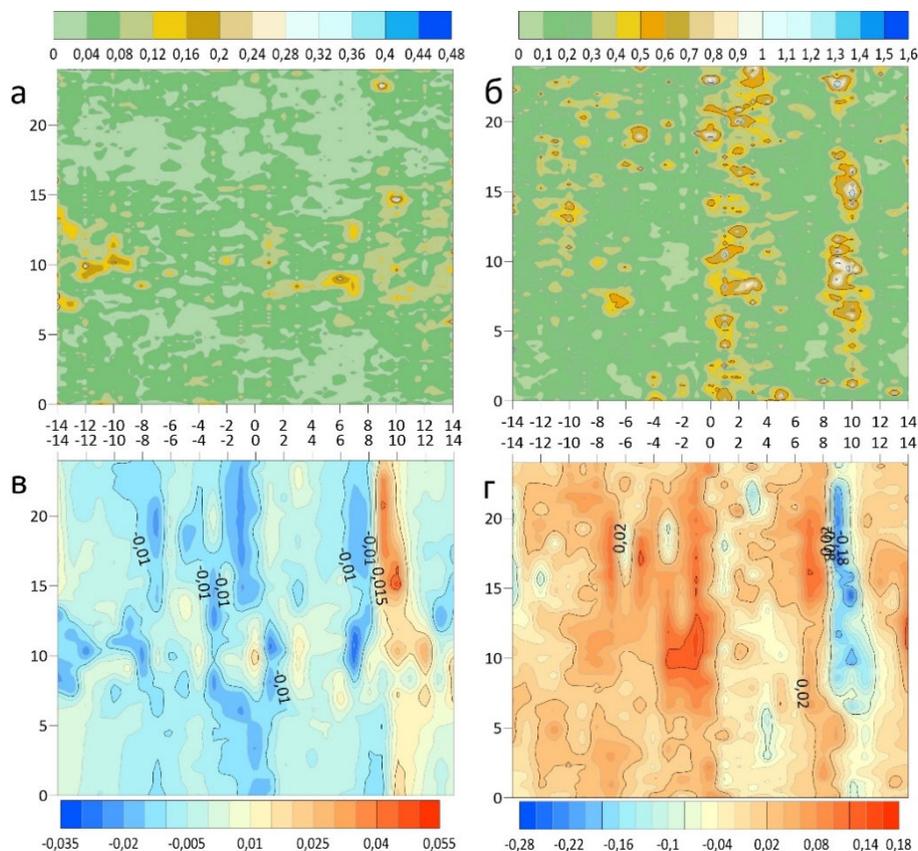


Рис. 4. Вариации магнитного поля на станции PAG. Динамика модуля вариаций: а) компоненты (Z) и б) компоненты (H) магнитного поля до и после землетрясения, в) отклонение компоненты (Z) и г) (H) от текущего среднего значения за 15 дней

Заключение

Задача прогнозирования землетрясений является важной из-за человеческих жертв и больших разрушений в результате сильных сейсмических событий. Изначально она решалась путем наращивания сети сейсмических станций, а поиск предвестников землетрясений основывался на анализе записей сейсмографов, данных по деформациям земной коры, геохимическим параметрам и др. Но до сих пор надежной методики прогноза землетрясений нет, поэтому нет сомнений в необходимости междисциплинарного подхода. Землетрясения в феврале 2023 года в Турции могут быть отличным вариантом для проверки методик выявления предвестников в ионосфере и магнитном поле Земли, так как серия этих сейсмических событий произошла в месте, где есть геофизические обсерватории. После предварительного анализа мы хотим продолжить анализ, в том числе, используя

метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений [11] и не только для Турецкого землетрясения, но и для других сильных землетрясений, с целью уточнения модели литосфера-атмосфера-ионосфера (*LAIC*).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019). Данные по ионосферным параметрам получены с сайта *GIRO* (<http://space.info/SMWG/Observatory/GIRO>), данные по геомагнитным параметрам получены с сайта *INTERMAGNET* (<http://www.intermagnet.org>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reinisch B. W., Galkin I. A. Global ionospheric radio observatory (GIRO) // *Earth, Planets, and Space*. – 2011. – Vol. 63. – P. 377-381.
2. Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений // *Моделирование предвестников землетрясений*. – М.: Наука, 1980. – С. 7–24.
3. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В. Прогноз землетрясений возможен?! Интегральные технологии многопараметрического мониторинга геоэффективных явлений в рамках комплексной модели взаимосвязей в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли. – М.: Тривант, 2014. – 144 с.
4. Давиденко Д.В., Пулинец С.А. Детерминированная изменчивость ионосферы в преддверии сильных ($M \geq 6$) землетрясений в регионах Греции и Италии по данным многолетних измерений // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2019. – Т. 59. – № 4. – С. 529–544.
5. Белинская А.Ю., Ковалев А.А., Семаков Н.Н., Белинская С.И. Вариации параметров ионосферы и геомагнитного поля во время Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г. // *Солнечно-земная физика*. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С.98-105.
6. Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // *Физика Земли*. – 2012. – № 2. – С. 84–87.
7. Черногор Л.Ф. Геомагнитные возмущения, сопровождавшие Великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2019. – Т. 59. – № 1. – С. 69–82.
8. Whitehead J.D. Sporadic E layers: History and recent observations // *Adv. Space Res.* – 1990. – V.10 (10). – P. 85–91.
9. Белинская А.Ю., Ковалев А.А., Карлин В.Э. Вариации слоя Es над Новосибирском в 23 и 24 солнечных циклах // *Динамические процессы в геосферах*. – 2022. – Т.14. – №1. – С. 93–100.
10. Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review // *Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan*. – 2001. – V. 121-A. – P. 893–898.
11. Пулинец С. А., Давиденко Д. В., Будников П. А. Метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2021. – Т.61. – №1. – С.103-114.

© А. А. Ковалев, А. Ю. Белинская, Н. Н. Семаков, 2023