

**ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ВО ВРЕМЯ БАЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 18 ИЮНЯ 2013 г.****VARIATIONS OF IONOSPHERIC AND GEOMAGNETIC FIELD PARAMETERS  
DURING THE JUNE 18, 2013 BACHAT EARTHQUAKE****А.Ю. Белинская***Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия, BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru***А.А. Ковалев***Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия, KovalevAA@ipgg.sbras.ru***Н.Н. Семаков***Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия, SemakovNN@ipgg.sbras.ru***С.И. Белинская***Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Иркутск, Россия, Sofiabel@mail.ru***A.Yu. Belinskaya***Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru***A.A. Kovalev***Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, KovalevAA@ipgg.sbras.ru***N.N. Semakov***Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, SemakovNN@ipgg.sbras.ru***S.I. Belinskaya***Irkutsk State Transport University,  
Irkutsk, Russia, Sofiabel@mail.ru*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования вариаций ионосферных параметров и локальной магнитной постоянной до, во время и после Бачатского землетрясения, которое произошло 18.06.2013 в 23:02 UT (19.06.2013 в 06:02 LT) с магнитудой 5.3–5.6 и координатами эпицентра 54.29° N, 86.17° E. Для анализа использованы данные ионосферных станций Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) и Томского государственного университета (ТГУ), а также геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET. Установлено, что в период, предшествующий землетрясению, наблюдалось довольно резкое возрастание магнитного момента, а последующий период характеризовался не менее резким понижением магнитного момента. Отмечается, что наиболее перспективным для поиска геомагнитных предвестников землетрясений, представляется анализ среднесуточных значений локальной магнитной постоянной. Выявлено существование низкого сильного спорадического слоя E<sub>s</sub> в течение двух суток до события, подобного которому не наблюдалось 15 дней до и 15 дней после. Кроме того, в дни, предшествующие толчку, наблюдается превышение фоновых значений критической частоты слоя F2 более чем на 20 % в локальные предвосходящие часы. После землетрясения на вторые сутки выделялась ночная область пониженных значений (порядка 16 %), которая сохранялась до утра третьих суток.

**Ключевые слова:** землетрясение, ионосфера, спорадический слой ионосферы, локальная магнитная постоянная.

**Abstract.** The paper presents the results of a study of variations in ionospheric parameters and local magnetic constant before, during, and after the Bachat earthquake, which occurred on June 18, 2013 at 23:02 UT (June 19, 2013 at 06:02 LT) with a magnitude 5.3–5.6 and epicenter coordinates 54.29° N, 86.17° E. We have used data from IPGG SB RAS and TSU ionospheric stations and INTERMAGNET geomagnetic observatories. We have established that in the period preceding the earthquake there was a rather sharp increase in the magnetic moment, and in the subsequent period there was an equally sharp decrease in the magnetic moment. It is noted that the analysis of the daily average values of the local magnetic constant is the most promising for searching for geomagnetic precursors of earthquakes. We have found a low strong sporadic layer E<sub>s</sub> for two days before the event, the like of which was not observed for 15 days before and 15 days after the event. In addition, on the days preceding the shock, the background values of the F2-layer critical frequency were larger by more than 20 % at the local pre-event hours. On the second day after the earthquake, there appeared a night-time region of low values (about 14 %), which persisted until the morning of the third day.

**Keywords:** earthquake, ionosphere, sporadic ionospheric layer, local magnetic constant.

**ВВЕДЕНИЕ**

Бачатское землетрясение произошло 18 июня 2013 г. в 23:02 UT (19.06.2013 в 06:02 LT) с магнитудой 5.3–5.8 и координатами эпицентра 54.29° N,

86.17° E на площади одноименного угольного разреза в Кузбассе. Интенсивность колебаний в эпицентральной зоне землетрясения  $I_0 = 7$  баллов. В 5-балльную зону попали города Кузбасса, землетрясение ощущалось и за пределами Кемеровской области.

Мнения о генезисе Бачатского землетрясения, приведенные в литературе, подчас расходятся. Ряд авторов считают очевидным, что землетрясение было инициировано техногенной деятельностью [Еманов и др., 2014, 2016; Батугин, 2017; Адушкин, 2016; и др.], приводя в качестве аргументов расположение гипоцентра и большинства афтершоков непосредственно под карьером, изменение существующих в массиве естественных геодинамических и гидродинамических режимов под воздействием комплекса техногенных нагрузок и регулярное воздействие на горный массив промышленных взрывов с суммарным весом заряда в сотни тонн. Другие авторы, используя численные расчеты, предполагают, что расположение гипоцентра на глубине нескольких километров свидетельствует о слабом влиянии горных работ и даже утверждают, что «...горные работы по выемке угля из Бачатского карьера не могли быть причиной Бачатского землетрясения 18.06.2013 ввиду незначительного изменения напряженно-деформированного состояния вблизи его окрестности, вследствие чего это землетрясение нельзя считать техногенным» [Ловчиков, Савченко, 2016; и др.]. Комплексный анализ генезиса Бачатского землетрясения [Кочарян и др., 2019] показал, что его основным триггером, скорее всего, явились горные работы, которые приблизили момент землетрясения, подготавливаемого естественной эволюцией земной коры. Таким образом, оно может считаться самым крупным природно-техногенным сейсмическим событием в истории планеты.

Как известно, землетрясения могут оказывать влияние на вариации геомагнитного поля. В ряде работ отмечались временные изменения модуля вектора магнитной индукции с различными характерными временами от нескольких минут до часов, которые могут быть связаны с периодами подготовки или разгрузки напряженного состояния земной коры [Гульельми, Зотов, 2012; Черногор, 2019]. В последней работе обнаружены цуги колебаний геомагнитного поля с периодом 400–900 с, последовавшие за землетрясением. Авторы предполагают, что они могли быть вызваны модуляцией концентрации электронов под действием сейсмических и акустико-гравитационных волн. Но вариации с такими временами могут быть связаны и с солнечным влиянием на магнитосферу Земли. Механизмы генерации квазипериодических вариаций геомагнитного поля, связанных с землетрясением, возможно, вызваны генерацией сейсмических волн в литосфере, а также инфразвуковых и гравитационных волн в атмосфере. Движение нейтральной компоненты в атмосфере провоцирует движение ионосферной плазмы. В результате квазипериодических колебаний концентрации электронов в ионосфере возникают вариации плотности ионосферных токов и, в конечном итоге, изменения уровня геомагнитного поля. Есть работы, в которых анализируются другие «силовые» или угловые элементы земного магнетизма [Спивак, Рябова, 2019]. В них, как правило, тоже рассматриваются вариации с периодом менее суток. Но более существенный недостаток указанных работ заключается в том, что величина анализируемых «сило-

вых» элементов земного магнетизма на самом деле зависит не только от изменения магнитного момента эквивалентного диполя, но и от изменения его ориентации. И эти изменения могут оказывать противоположное влияние на анализируемый силовой элемент.

Расстояние от эпицентра до Геофизической обсерватории солнечно-земной физики ИНГГ СО РАН (Новосибирск) составило порядка 200 км. Таким образом, мы практически могли наблюдать состояние ионосферы над очагом, так как ионозонд позволяет получать информацию об ионосфере до максимума электронной концентрации в радиусе около 250 км от пункта наблюдений. Исследования последних лет выявили взаимосвязь между геосферами, которая проявляется и в литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связях. За несколько дней или часов до начала землетрясения возникают многочисленные аномальные изменения параметров среды и электромагнитного поля [Липеровский и др., 2008; Пулинец и др., 2015; Корсунова и др., 2013]. Однако, несмотря на многочисленные работы в этом направлении, в настоящее время нет общепринятой точки зрения, позволяющей интерпретировать наблюдения за ионосферой над сейсмически активными районами, хотя и существует несколько гипотез. Ионосферные неоднородности и связываемые с ними эффекты часто проявляются во время и после землетрясений; неоднородности регистрируются как в нейтральной, так и в ионизированной компонентах ионосферы; пространственные масштабы проявления возмущений значительны. Эффекты, предвещающие землетрясение, отмечались на всех станциях, входящих в зону подготовки землетрясения, определяемую радиусом Добровольского  $R_d = 10^{0.43M}$ , где  $R_d$  — радиус зоны подготовки (км),  $M$  — магнитуда землетрясения [Добровольский и др., 1980].

## ДАННЫЕ ПО ГЕОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ И ИОНОСФЕРЕ

Для Бачатского землетрясения радиус Добровольского составил как минимум 190 км, а возможно, даже 312 км (разные исследователи дают различные оценки магнитуды). Исходя из этого, можно с уверенностью говорить о том, что Геофизическая обсерватория солнечно-земной физики попадает в область подготовки этого землетрясения.

Для устранения эффектов, связанных с воздействием Солнца, анализировались среднесуточные значения магнитных характеристик в ближайших магнитных обсерваториях. В работе использована локальная магнитная постоянная  $G$ , которая является чисто силовой характеристикой магнитного поля [Вагер, 1914]. Из ближайших к центру землетрясения обсерваторий были взяты данные, которые находятся в свободном доступе на сайте сети INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org>] (см. табл., где  $r$  — расстояние от эпицентра Бачатского землетрясения до магнитной станции).

Для рассматриваемых обсерваторий вычислялась скорость изменения среднесуточного значения модуля вектора магнитной индукции ( $DF$ ). Кроме того, в статье обсуждается локальная магнитная постоянная  $G$ . Она связана с магнитным моментом диполя  $M$  соотношением  $M = GR^3$ , где  $R$  — расстояние от диполя до точки наблюдения. Величина  $G$  вычисляется по формуле  $G = (X^2 + Y^2 + 0.25Z^2)^{0.5}$  [Bauer, 1914]. Среднесуточные значения северной ( $X$ ), восточной ( $Y$ ) и вертикальной составляющей ( $Z$ ) вектора магнитной индукции рассчитывались по минутным значениям, взятым с сайта INTERMAGNET.

Станция	Код	Координаты		$r_s$ , км
		° N	° E	
Новосибирск	NVS	54.85	83.23	201
Иркутск	IRT	52.27	104.45	1230
Алма-Ата	AAA	43.2	76.9	1407

В статье представлены 15-минутные данные по параметрам ионосферы, которые получены в обсерватории солнечно-земной физики ИНГГ СО РАН, код станции NS355, расстояние до эпицентра 201 км, и на ионосферной станции ЦКП «Физика ионосферы и электромагнитная экология» ТГУ (цифровой ионозонд Томион), код станции ТК356, расстояние до эпицентра 260.5 км. Нами рассмотрены критические частоты и действующие высоты слоев E, E<sub>s</sub>, F1 и F2. Для этого события были также рассчитаны скользящие медианные значения для каждого часа и отклонения наблюдаемых значений от них (в процентах).

### ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РАССМАТРИВАЕМЫЙ ПЕРИОД

На рис. 1, а представлены характеристики солнечной активности в июне 2013 г. Видно, что за 5 дней до и 5 дней после Бачатского землетрясения вспышки на Солнце не отмечались, не было усиления солнечного ветра, т. е. не наблюдалось особого солнечного воздействия на геосферу. Согласно мировым данным [https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv], геофизическая обстановка в это время тоже была спокойной (рис. 1, б).

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 видно, что разброс минутных значений модуля вектора магнитной индукции  $F$  с 13 до 23 июня 2013 г. не превышал 30 нТл и величина склонения  $D$  изменялась в указанный период не более чем на 0.4°. Таким образом, магнитное поле по данным ближайшей обсерватории «Новосибирск» в период с 11 по 26 июня 2013 г. было относительно спокойным.

График изменения модуля вектора магнитной индукции  $F$  для трех станций (рис. 3) демонстрирует согласованные изменения в разнесенных в пространстве пунктах. Стоит отметить, что 18 июня минимум суточного хода  $F$  в Новосибирске отличается от других дней этого ряда, причем для других станций,

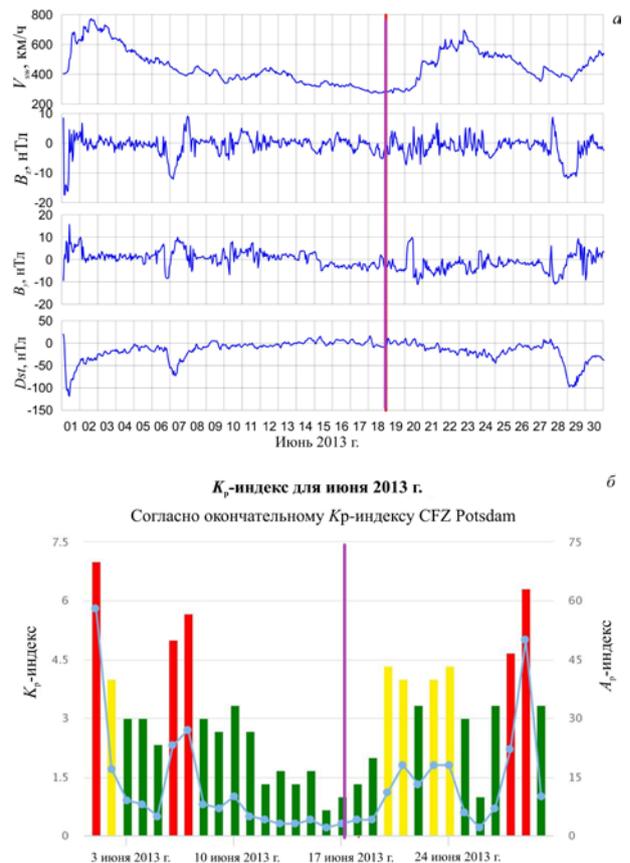


Рис. 1. Солнечная активность в июне 2013 г. Сиреневая линия — день Бачатского землетрясения. Сверху вниз на панелях приведены: а — скорость солнечного ветра, направление межпланетного магнитного поля ( $B_z$  и  $B_y$ ),  $Dst$ -индекс; б — геомагнитные  $K_p$ - и  $A_p$ -индексы в июне 2013 г.

более удаленных от эпицентра, такого не наблюдается. Хорошо видно, что 12–23 июня присутствуют возмущения этой величины, но они отмечаются не только в Новосибирске, но и в Иркутске, и в Алма-Ате, поэтому их не следует связывать с Бачатским землетрясением.

Полагая, что расстояние от центрального диполя до каждой из обсерваторий остается неизменным на рассматриваемом временном интервале, по изменению  $G$  мы можем судить об относительном изменении магнитного момента (рис. 4).

Можно отметить, что в период, предшествующий землетрясению, наблюдается возрастание скорости изменения магнитного момента, а последующий период характеризуется ее понижением. Связаны ли эти изменения с подготовкой сейсмического события и его разгрузкой — вопрос, требующий дальнейшего изучения.

На рис. 5 представлены изменения критических частот  $f$  и действующих высот  $h$  с 13 по 23 июня 2013 г. для Новосибирска. Отчетливо видно, что за двое суток до момента Бачатского землетрясения и через сутки после него отмечается необычное состояние ионосферы. В это время наблюдается низкий толстый слой E<sub>s</sub>, который практически полностью экранирует слой F1 в этот временной промежуток.

Для уточнения ситуации в ионосфере в этот период, как уже говорилось выше, вычислялись откло-

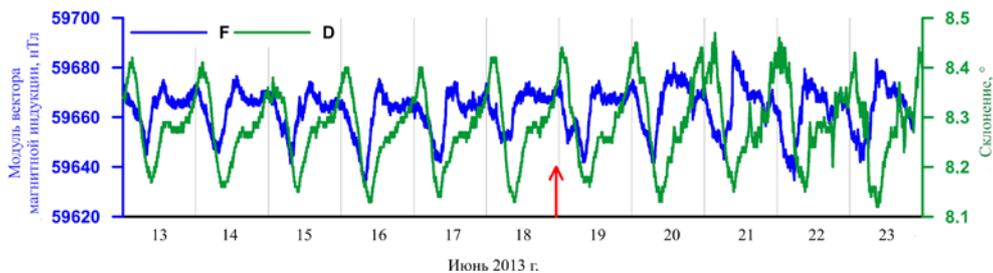


Рис. 2. Модуль вектора магнитной индукции  $F$  и склонение  $D$  в обсерватории Новосибирск в течение пяти дней до и пяти дней после Бачатского землетрясения (обозначено красной стрелкой)

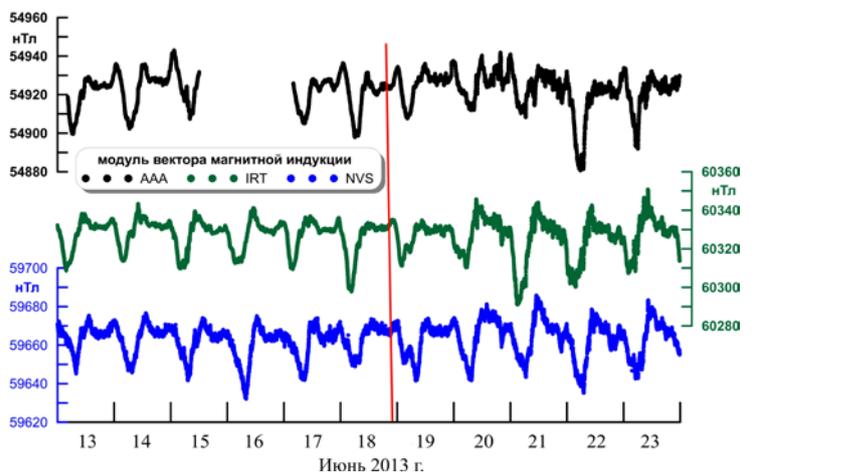


Рис. 3. Модуль вектора магнитной индукции по данным геомагнитных обсерваторий Новосибирск, Иркутск и Алма-Ата в течение пяти дней до и пяти дней после Бачатского землетрясения (обозначено красной линией)

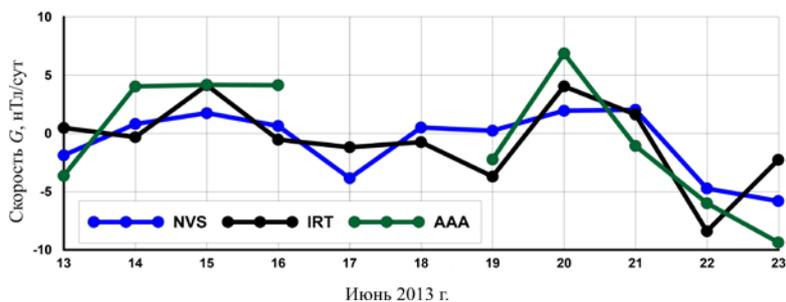


Рис. 4. Скорость изменения локальной магнитной постоянной по данным геомагнитных обсерваторий Новосибирск, Иркутск и Алма-Ата в течение пяти дней до и пяти дней после Бачатского землетрясения

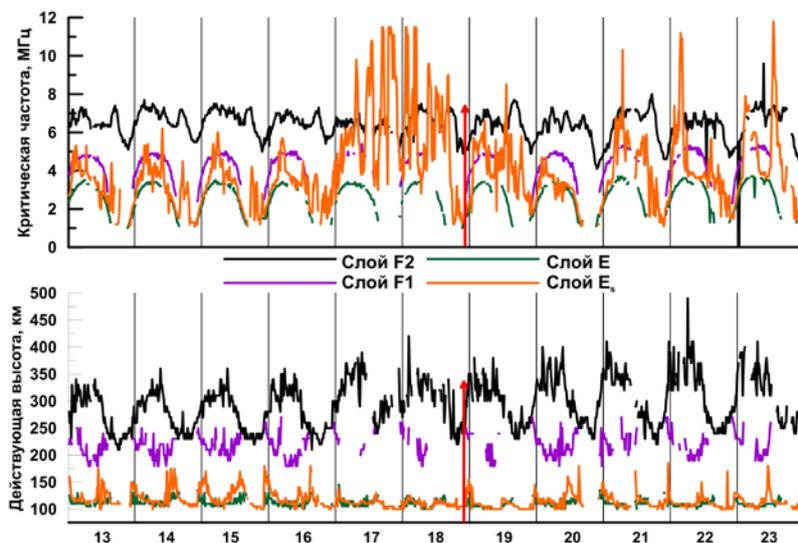


Рис. 5. Изменения ионосферных параметров  $f$  и  $h$  для Новосибирска в течение пяти дней до и пяти дней после Бачатского землетрясения (обозначено красной стрелкой)

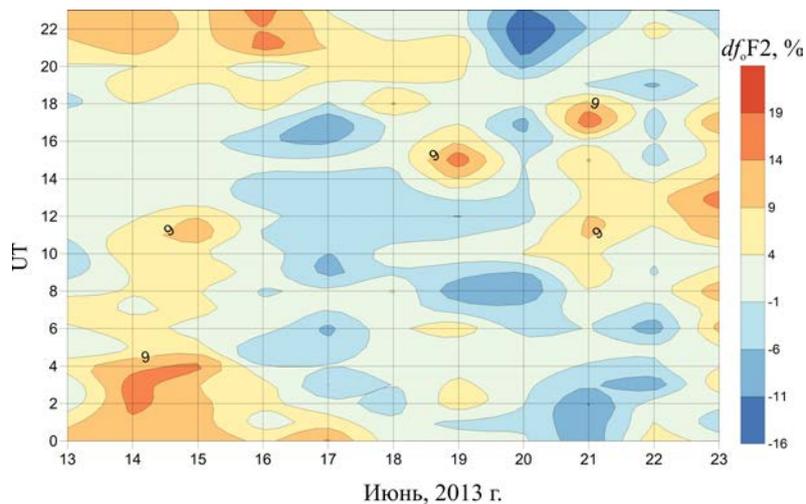


Рис. 6. Суточное отклонение критической частоты  $df_oF2$  слоя F2 от фоновых значений в процентах в течение пяти дней до и пяти дней после Бачатского землетрясения

нения параметров ионосферы от 15-дневного скользящего среднего (рис. 6). Для этого землетрясения за два дня до толчка наблюдается превышение фоновых значений  $f_oF2$  более чем на 20 % в локальные предвосходные часы. После землетрясения на вторые сутки выделяется область пониженных значений (порядка 16 %) (рис. 6). В работе [Давиденко, Пулинец, 2019] отмечено увеличение критической частоты слоя F2 (до 24 %) ионосферы с 22 до 7 LT в отличие от наших наблюдений за сутки до землетрясения. Пониженных значений после землетрясения авторы не отмечают. Возможно, отличия вызваны тем, что эпицентр Бачатского землетрясения был на более близком расстоянии от точки ионосферных наблюдений, чем эпицентры землетрясений до станций вертикального зондирования в вышеупомянутой работе.

Особенно ярко проявляется землетрясение в характеристиках слоя  $E_s$  (рис. 7). За двое суток до и в день события наблюдается превышение значений критических частот на 200 % по сравнению со скользящими средними. После землетрясения  $f_oE_s$  падает и отклонения составляют до 60 %. Надо отметить, что за весь месяц таких экстремальных отклонений не наблюдалось (рис. 7). Кроме того, в течение двух дней перед землетрясением наблюдается большая изменчивость критической частоты слоя  $E_s$  (рис. 8). Возможно, так проявляются акустико-гравитационные волны, возникающие в приповерхностном слое атмосферы вследствие активизации сейсмогравитационных колебаний Земли перед землетрясениями [Ахмедов, Куницын, 2004; Куницын и др., 2015].

Для выявления пространственных особенностей поведения ионосферы в рассматриваемый период для анализа были привлечены данные вертикального зондирования, полученные на Томской ионосферной станции. К сожалению, в июне 2013 г. на этой станции были неполадки, поэтому нам доступны данные только за 8–23 июня. Для сравнения параметров ионосферы использовались 15-минутные измерения критических частот  $f$  и действующих высот  $h$  ионосферных слоев, дополнительно нами были

вычислены разности максимальной плотности ионизации в слое  $E_s$  для двух пунктов наблюдений в один и тот же момент времени (часовые значения). Надо заметить, что Томская ионосферная станция, возможно, попадает в зону подготовки землетрясения, определяемую радиусом Добровольского, если верны верхние оценки магнитуды Бачатского землетрясения.

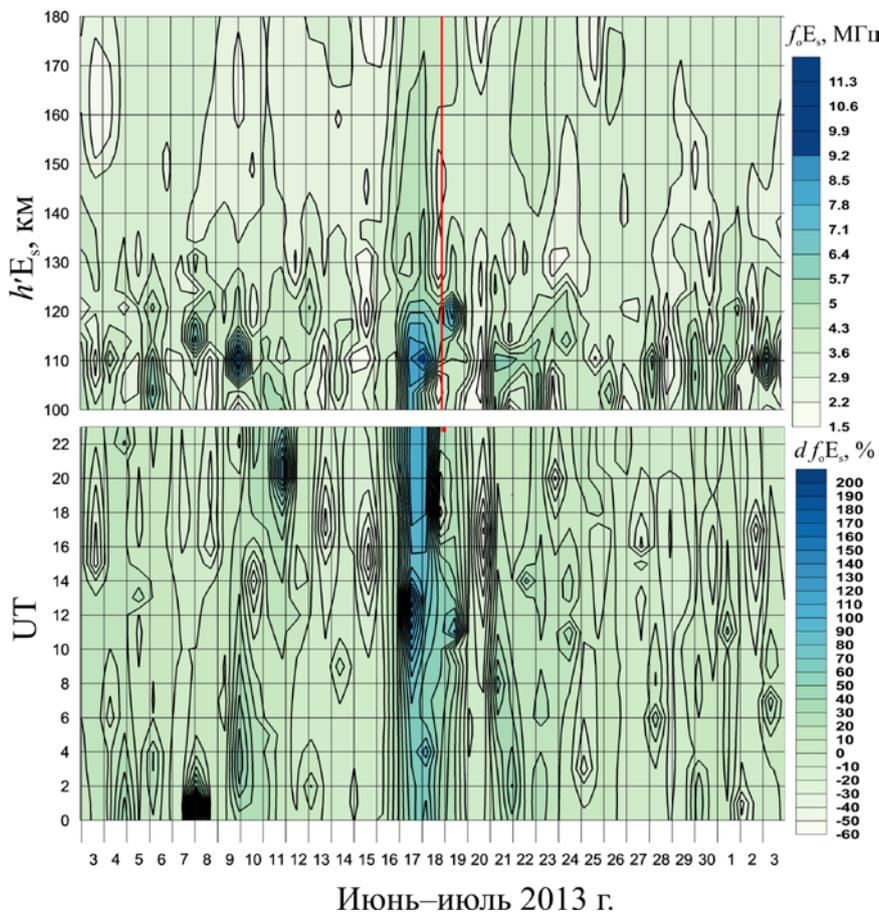
На рис. 9 видно, что над Томском в течение двух суток до землетрясения возмущения в слое  $E_s$  ионосферы также наблюдаются, но имеют меньшую амплитуду.

Одной из основных характерных частот, определяемых по ионограмме при вертикальном зондировании, является частота экранирования  $f_bE_s$ . Она соответствует максимальной плотности ионизации в слое  $E_s$ :  $f_bE_s \sim (N_{\max}E_s)^{1/2}$ . Сейсмоионосферные эффекты в слое  $E_s$  могут быть вызваны акустическими волнами, распространяющимися от поверхности Земли до высот ионосферы [Липеровский и др., 1999]. Надо отметить, что за двое суток до события наблюдается нарушение суточного хода этой величины, который отчетливо виден в остальные дни. Сравнение значений максимальной плотности ионизации в слое  $E_s$  для разнесенных станций показывает интересную картину (рис. 10). В наблюдаемый период на двух станциях имеются отклонения (вычислялось отклонение новосибирских данных от томских в процентах) на протяжении всех дней, но в течение двух суток до основного толчка мы видим над Новосибирском значительно большую плотность ионизации, в то время как во время самого толчка значения, отмечаемые в Томске, резко возрастают. Возможно, отличия в поведении спорадического слоя для этих двух пунктов объясняются разными расстояниями от них до эпицентра землетрясения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальный анализ поведения ионосферных и геомагнитных параметров до, во время и после Бачатского землетрясения показал следующие особенности:

- за двое суток до основного толчка в нижней ионосфере наблюдаются значительные изменения



Июнь–июль 2013 г.

Рис. 7. Величины критической частоты слоя  $E_s$  в зависимости от дня наблюдения и его действующей высоты (верхняя панель). Красной линией обозначен момент землетрясения. Отклонение значений критической частоты слоя  $E_s$  от фоновых значений в зависимости от дня и часа наблюдения в процентах (нижняя панель). Красной точкой обозначен момент землетрясения

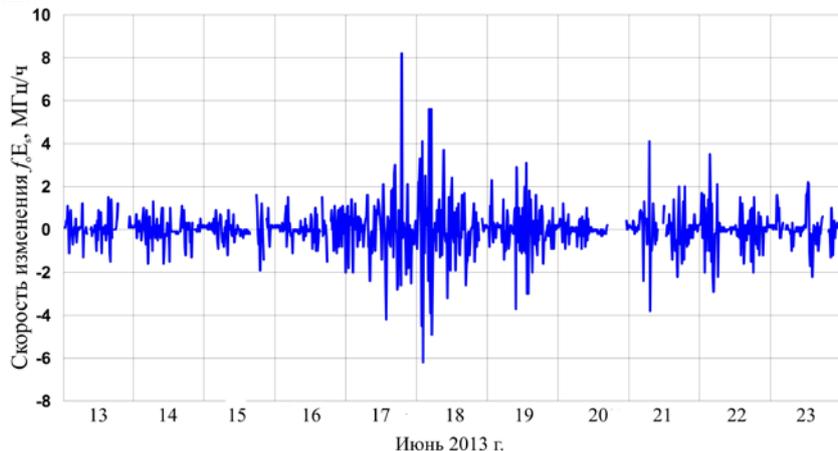


Рис. 8. Скорость изменения критической частоты слоя  $E_s$  в течение пяти дней до и пяти дней после землетрясения для Новосибирска

(повышенные значения плотности ионизации в спорадических слоях, их сильная изменчивость от часа к часу и низкая высота образования этих структур), причем на большем удалении от эпицентра эти возмущения менее выражены;

- за два дня до толчка наблюдается превышение фоновых значений критической частоты слоя F2 в локальные предвосходные часы, а на вторые сутки после землетрясения — понижение значений этого параметра;

- значимые изменения в магнитном поле Земли в области подготовки этого землетрясения нами не были выявлены.

Ионосферные возмущения на заключительной стадии землетрясений наблюдаются во всей зоне его подготовки, определяемой радиусом Добровольского. Поэтому полученные нами данные могут служить подтверждением того, что Бачатское землетрясение было проявлением не только техногенного воздействия, но и носило природный характер.

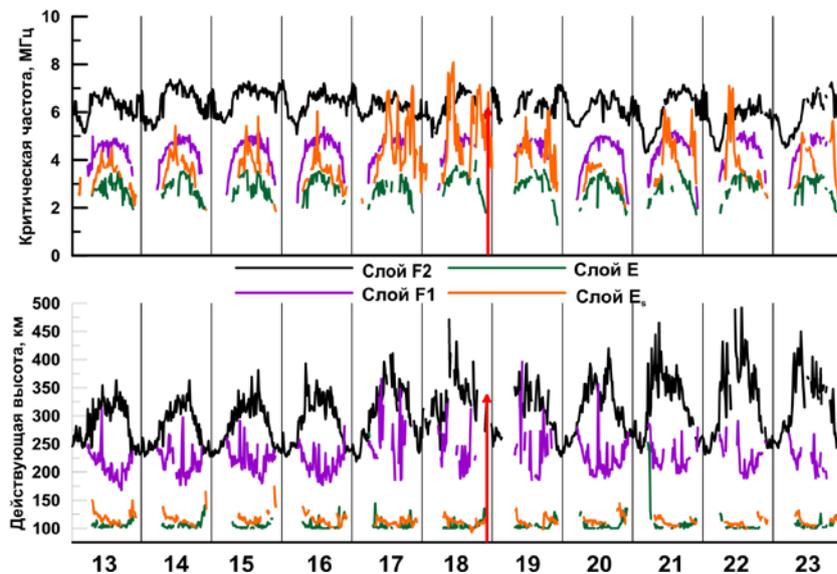


Рис. 9. f- и h-графики ионосферных параметров для Томска за 5 дней до и 5 дней после Бачатского землетрясения (на графике обозначено красной стрелкой)

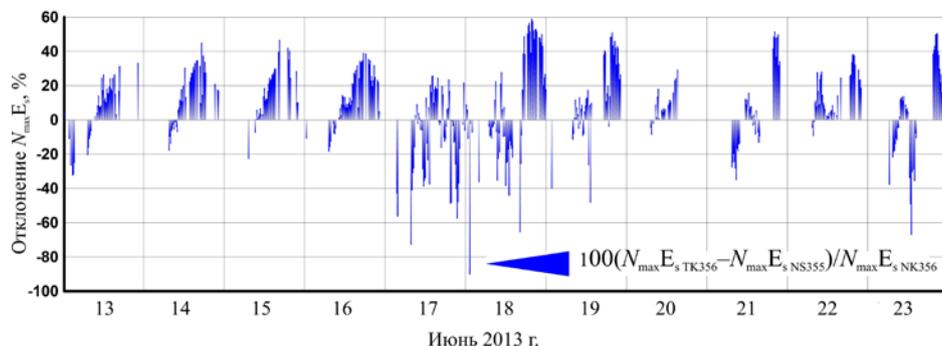


Рис. 10. Разности значений максимальной плотности ионизации в слое  $E_s$  над Томском и Новосибирском в июне 2013 г.

В заключение можно отметить, что наиболее перспективным для поиска силовых геомагнитных предвестников землетрясений, на наш взгляд, представляется анализ среднесуточных значений локальной магнитной постоянной.

Выражаем благодарность сотрудникам Томской ионосферной станции, а также сотрудникам магнитных обсерваторий Иркутск и Алма-Ата за предоставленные данные.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки РФ № 0331-2019-0013.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44. DOI: [10.7868/S0002233716020010](https://doi.org/10.7868/S0002233716020010).  
 Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 44, № 1. С. 105–112.  
 Батугин А.С. К анализу тектонофизических условий проявления техногенных землетрясений // Иссл. по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5, № 2. С. 102–107. DOI: [10.2205/2017BS045](https://doi.org/10.2205/2017BS045).  
 Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2012. № 2. С. 84–87.

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 аэронавигация. 2019. Т. 59, № 4. С. 529–544. DOI: [10.1134/S0016794019040084](https://doi.org/10.1134/S0016794019040084).

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.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. и др. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 41–46. DOI: [10.21455/VIS2016.4-3](https://doi.org/10.21455/VIS2016.4-3).

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. ( $M_L=6.1$ ) в Кузбассе — сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43, № 4. С. 34–60.

Корсунова Л. П., Хегай В. В., Михайлов Ю. М., Смирнов С.Э. Закономерности в проявлении предвестников землетрясений в ионосфере и приземных атмосферных электрических полях на Камчатке // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53, № 2. С. 239–246.

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 г. // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 3. С. 741–759. DOI: [10.5800/GT-2019-10-3-0439](https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439).

Куницын В.Е., Крысанов Б.Ю., Воронцов А.М. Генерация акустико-гравитационных волн различными источ-

никами на поверхности Земли // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 6. С. 112–119.

Липеровский В.А., Сенченков С.А., Липеровская Е.В. и др. Изучение возмущений во временном ходе частоты  $f_b E_s$  ночного среднеширотного слоя  $E_s$ , на основе минутных измерений // Геомагнетизм и аэронаука. 1999. Т. 39, № 1. С. 131–134.

Липеровский В.А., Похотелов О.А., Мейстер К.-В., Липеровская Е.В. Физические модели связей в системе литосфера–атмосфера–ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэронаука. 2008. Т. 48. С. 831–843.

Ловчиков А.В., Савченко С.Н. О техногенной природе Бачатского землетрясения 18.06.2013 // Четвертая тектонофизическая конференция ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле»: материалы докладов. 2016. С. 478–480.

Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэронаука. 2015. Т. 55, № 4. С. 540–558. DOI: [10.7868/S0016794015040136](https://doi.org/10.7868/S0016794015040136).

Спивак А.А., Рябова С. А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019. № 6. С. 3–12. DOI: [10.31857/S0002-3337201963-12](https://doi.org/10.31857/S0002-3337201963-12).

Черногор Л.Ф. Геомагнитные возмущения, сопровождавшие Великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. // Геомагнетизм и аэронаука. 2019. Т. 59, № 1. С. 69–82. DOI: [10.1134/S0016794019010048](https://doi.org/10.1134/S0016794019010048).

Bauer L.A. The local magnetic constant and its variations // Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1914. Vol. 19, no. 3. P. 113–125.

URL: <https://www.intermagnet.org> (дата обращения 5 июня 2020 г.).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv> (дата обращения 5 июня 2020 г.).

## REFERENCES

Adushkin V.V. Tectonic earthquakes of anthropogenic origin. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016, vol. 52, pp. 173–194. DOI: [10.1134/S1069351316020014](https://doi.org/10.1134/S1069351316020014).

Akhmedov R.R., Kunitsyn V.E. Simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes and explosions. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2004, vol. 44, no. 1, pp. 95–101.

Batugin A.S. To the analysis of tectonophysical conditions of earthquakes of anthropogenic origin. *Issledovaniya po geoinformatike: trudy Geofizicheskogo tsentra RAN* [Geoinformatics Research Papers: Proc. the Geophysical Center RAS]. 2017, vol. 5, no. 2, pp. 102–107. DOI: [10.2205/2017BS045](https://doi.org/10.2205/2017BS045). (In Russian).

Bauer L.A. The local magnetic constant and its variations. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1914, vol. 19, no. 3, pp. 113–125.

Chernogor L.F. Geomagnetic disturbances accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 1, pp. 62–75. DOI: [10.1134/S0016793219010043](https://doi.org/10.1134/S0016793219010043).

Guglielmi A.V., Zotov O.D. Magnetic perturbations before the strong earthquakes. *Izv., Phys. Solid Earth*. 2012, vol. 48, pp. 171–173. DOI: [10.1134/S1069351312010065](https://doi.org/10.1134/S1069351312010065).

Davidenko D.V., Pulinetz S.A. Deterministic variability of the ionosphere on the eve of strong ( $M \geq 6$ ) earthquakes in the regions of Greece and Italy according to long-term measurements data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 4, pp. 493–508.

Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of the zone of manifestation of earthquake precursors. *Modelirovanie predvestnikov zemletryaseni* [Modeling of earthquake precursors], Moscow, Nauka Publ., 1980, pp. 7–24. (In Russian).

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G. Technogenic seismicity of Kuzbass sections (Bachat earthquake on June 18, 2013). *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mineral Development]. 2014, no. 2, pp. 41–46. DOI: [10.21455/VIS2016.4-3](https://doi.org/10.21455/VIS2016.4-3). (In Russian).

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V. The technogenic Bachat earthquake of June 18, 2013 (ML=6.1) in the Kuznetsk Basin — the world's strongest in the extraction of solid minerals. *Seismic Instruments*. 2017, vol. 53, pp. 333–355. DOI: [10.3103/S0747923917040041](https://doi.org/10.3103/S0747923917040041).

Korsunova L.P., Khagai V.V., Mikhailov Yu.M., Smirnov S.E. Regularities in the manifestation of earthquake precursors in the ionosphere and near-surface atmospheric electric fields in Kamchatka. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013, vol. 53, no. 2, pp. 227–233. DOI: [10.1134/S0016793213020084](https://doi.org/10.1134/S0016793213020084).

Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Budkov A.M., Ivanchenko G.N. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics]. 2019, vol. 10, no. 3, pp. 741–759. DOI: [10.5800/GT-2019-10-3-0439](https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439). (In Russian).

Kunitsyn V.E., Krysanov B.Yu., Vorontsov A.M. Acoustic-gravity waves in the Earth's atmosphere generated by surface sources. *Moscow University Physics Bull.* 2015, vol. 15, no. 6, pp. 541–548.

Liperovskiy V.A., Senchenkov S.A., Liperovskaya E.V., Mayster K.-V., Rubtsov L.N., Alimov O.A. Studying disturbances in  $f_b E_s$  dynamics of the night mid-latitude  $E_s$  layer from minute measurements. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1999, vol. 39, no. 1, pp. 131–134. (In Russian).

Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Meyster K.-V., Liperovskaya E.V. Physical models of coupling in the lithosphere–atmosphere–ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008, vol. 48, no. 6, pp. 795–806. DOI: [10.1134/S0016793208060133](https://doi.org/10.1134/S0016793208060133).

Lovchikov A.V., Savchenko S.N. On the technogenic nature of the Bachatsky earthquake 06.18.2013. *Trudy Chetvertoi tektonofizicheskoi konferentsii IFZ RAN "Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle"* [Proc. the Fourth Tectonophysical Conference "Tectonophysics and Topical Issues of Earth Sciences"]. Moscow, 2016, pp. 478–480. (In Russian).

Pulinetz S.A., Uzunov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, no. 4, pp. 521–538. DOI: [10.1134/S0016793215040131](https://doi.org/10.1134/S0016793215040131).

Spivak A.A., Ryabova S.A. Geomagnetic variations during strong earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019, vol. 55, no 6, pp. 811–820. DOI: [10.1134/S1069351319060077](https://doi.org/10.1134/S1069351319060077).

URL: <https://www.intermagnet.org> (accessed June 5, 2020).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv> (accessed June 5, 2020).

Как цитировать эту статью:

Белинская А.Ю., Ковалев А.А., Семаков Н.Н., Белинская С.И. Вариации параметров ионосферы и геомагнитного поля во время Бачатского землетрясения (18.06.2013). *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 1. С. 98–105. DOI: [10.12737/szf-71202110](https://doi.org/10.12737/szf-71202110).