

УДК 550.343.62

## МЕТОД КОГНИТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2021 г. С. А. Пулинец<sup>1, \*</sup>, Д. В. Давиденко<sup>1, 2, \*\*</sup>, П. А. Будников<sup>3, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва (РКК “Энергия”), г. Королёв (Московская обл.), Россия

<sup>3</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова Росгидромета (ИПГ), г. Москва, Россия

\*e-mail: pulse@rssi.ru

\*\*e-mail: davidenkoe5@rambler.ru

\*\*\*e-mail: pavel9860@gmail.com

Поступила в редакцию 25.05.2020 г.

После доработки 12.06.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

В значительной части публикаций, связанных с возмущениями в ионосфере, возникающими в период подготовки землетрясений над областями их подготовки, эти возмущения называются аномалиями. В этом случае процесс идентификации ионосферного предвестника фактически основывается на оценке амплитуды отклонения ионосферных параметров от невозмущенного значения. Мы предлагаем совершенно иной подход, основанный на физическом механизме генерации возмущений, создаваемых за счет взаимодействия ионосферы с литосферой и атмосферой. При этом данное взаимодействие придает наблюдаемым вариациям уникальные свойства, характерные только для предвестников землетрясений, на основании которых и производится идентификация предвестников с помощью интеллектуального алгоритма. Еще одним преимуществом данного подхода является то, что метод, называемый нами когнитивной идентификацией, не нуждается в больших отклонениях от невозмущенных значений, поскольку основан на распознавании “образа” предвестника, созданного с учетом его морфологических признаков, и может эффективно использоваться даже при низких значениях отношения “сигнал/шум”.

DOI: 10.31857/S0016794021010132

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 60-х годов прошлого века внимание ученых привлекли необычные вариации электронной концентрации, возникавшие в ионосфере на фоне даже спокойной гелио-геомагнитной обстановки в зонах высокой сейсмической активности [Davies and Baker, 1965]. Было установлено, что сейсмическая активность является одним из источников ежедневной изменчивости ионосферы [Pulinets, 1998], а сами вариации появляются регулярно за несколько суток до сильных землетрясений ( $M \geq 5$ ), что позволило называть их ионосферными предвестниками землетрясений. Сразу встал вопрос, а как их идентифицировать на фоне ежедневной изменчивости ионосферы? В основном, исследователи пошли по проторенному пути, идентифицируя аномалии по максимальному отклонению от текущего среднего значения (или от текущей медианы). Примеры такой обработки можно найти в публикациях [Liu et al., 2004; Kon et al., 2011; Le et al., 2011]. Однако такой

подход сильно повышает порог обнаружения ионосферных предвестников, отсекая случаи, когда сейсмо-ионосферные вариации не выходят за средний уровень суточной изменчивости ионосферы. Еще в 2003 г. у нас возникла идея об уникальности морфологических признаков ионосферных предвестников, что предоставляет возможность при использовании этой информации идентифицировать предвестники не только в спокойных геомагнитных условиях, но даже на фоне геомагнитных бурь [Pulinets et al., 2003]. Развитие данного направления представлено в настоящей работе.

Еще в ранних работах по исследованию ионосферных аномалий, связанных с землетрясениями [Пулинец и др., 1998], было обнаружено, что генерация аномалий не однородна во времени, из-за чего они наблюдаются в определенные часы местного времени. Но за недостатком количества данных для статистического исследования, полученные результаты не были обобщены. Вторая

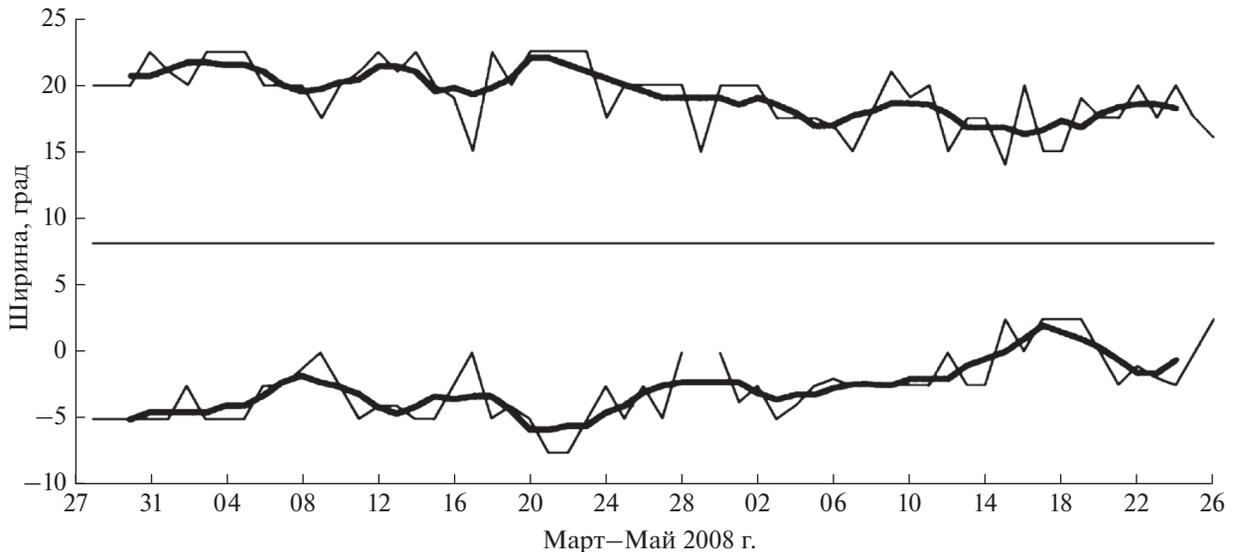


Рис. 1. Динамика широтного положения горбов экваториальной аномалии на долготе  $105^\circ$  E в период Сычуаньского землетрясения  $M7.9$  12 мая 2009 г.

фаза исследований в этом направлении была связана со статистической обработкой данных вертикального зондирования на станции Чунг-Ли на Тайване [Liu et al., 2004, 2006]. Эти исследования показали, что на Тайване основным предвестником землетрясений в ионосфере являются отрицательные отклонения критической частоты от невозмущенных значений, наблюдаемые в послеполуденные часы местного времени. Предполагалось, что такая морфология предвестника связана с динамикой горбов экваториальной аномалии, сдвигающихся по направлению к геомагнитному экватору под воздействием аномального электрического поля перед землетрясением, что в дальнейшем подтвердилось (рис. 1) [Pulinets et al., 2010]. Следует отметить, что остров Тайвань располагается под северным склоном экваториальной аномалии, а потому значение критической частоты в большой степени зависит от широты положения горба экваториальной аномалии.

Статистические исследования ионосферных вариаций перед землетрясениями в Европе показали, что основным предвестником является повышение значений полного электронного содержания (ПЭС) в ночные часы местного времени. Впервые это показал анализ ионосферных возмущений перед землетрясениями с магнитудой  $M \geq 6.0$  в Греции [Пулинец и др., 2014]. Для этих землетрясений была сконструирована так называемая «маска ионосферного предвестника», показывающая, что в среднем положительные отклонения ПЭС наблюдаются на временном интервале с 18 LT до 6 LT утра следующих суток по местному времени, т.е. наблюдаются непрерывно практически в течение 12 ч. Поначалу этот эффект не связывал-

ся нами с положением солнечного терминатора, но Золотов [2015] в своей диссертации достаточно убедительно показал, что положительные аномалии наблюдаются регулярно перед землетрясениями, причем их положение на динамических амплитудно-временных картах полного электронного содержания (ПЭС) находится за линией солнечного терминатора после захода и до восхода Солнца.

Дальнейшее развитие комплексной модели литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей [Pulinets et al., 2018] показало, что динамика пограничного слоя атмосферы в течение суток [Cushman-Roisin, 2014] способствует синергетическому эффекту, приводящему к изменению электрических свойств Глобальной Электрической Цепи (ГЭЦ) над областью подготовки землетрясения, что и инициирует генерацию ночной крупномасштабной положительной неоднородности в ионосфере в ночное время, как это подробно описано в [Пулинец и Давиденко, 2018].

Еще один способ идентификации предвестников основан на физическом механизме формирования экваториальной аномалии. Здесь наблюдается несколько эффектов: ослабление и усиление экваториальной аномалии, а также искажение ее формы [Пулинец и Легенька, 2002], долготный эффект в динамике экваториальной аномалии [Пулинец и др., 2010], внеурочное время развития экваториальной аномалии [Ryu et al., 2014]. Последний эффект в монографии [Pulinets and Ouzounov, 2018] был назван абсолютной аномалией.

И, наконец, при когнитивной идентификации предвестников необходимо использовать пре-

имущества многопараметрического мониторинга ионосферы, где учитываются не только вариации электронной концентрации, но и форма вертикального профиля, ионный состав, температура плазмы [Pulinets et al., 2003]. Комбинация морфологических признаков изменения различных параметров ионосферной плазмы перед землетрясением создает уникальный образ предвестника, позволяющий проводить его однозначную идентификацию.

## 2. САМОПОДОБИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ КАК ОСНОВА ИХ РАСПОЗНАВАНИЯ

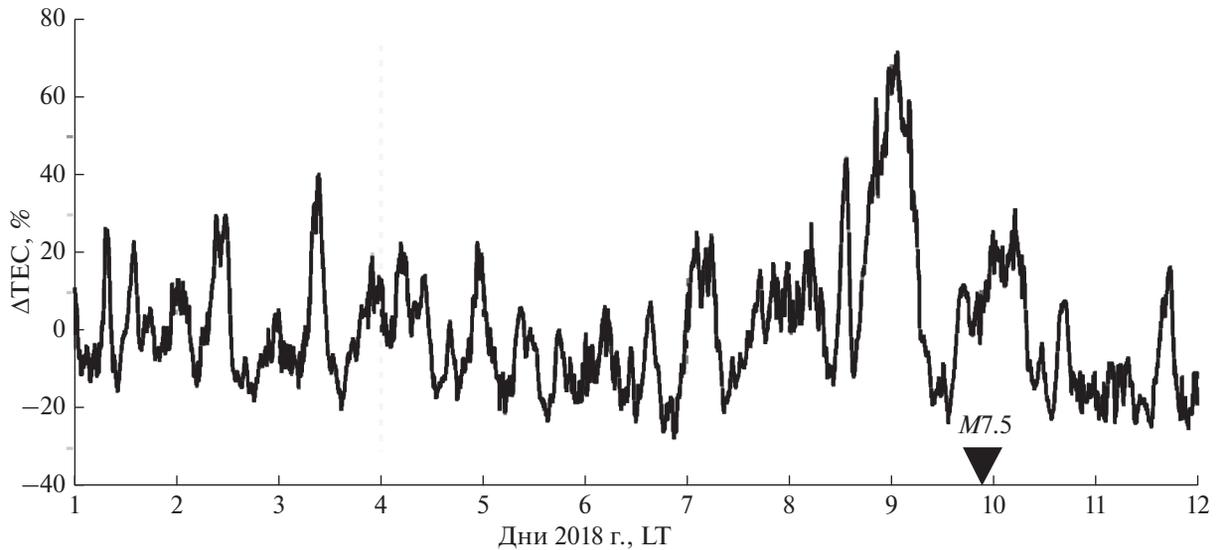
Физические механизмы генерации различных типов ионосферных предвестников были описаны в работах, цитируемых в предыдущем разделе, и приводят к пониманию уникальности вариаций в космической плазме, наблюдаемых перед землетрясениями. Именно их уникальность является основой идентификации, а не абстрактные отклонения от невозмущенного значения. Следующим шагом по использованию этих свойств ионосферных предвестников должна стать разработка практической технологии распознавания предвестников. Однозначность реакции среды на внешнее воздействие, определяемая выявленным физическим механизмом, позволяет говорить о свойстве предвестников, характерном для всех геофизических сред [Николаев, 2003] – их самоподобии [Гольдин, 2003]. В нашем случае это означает, что морфологические свойства ионосферных предвестников (поведение в местном времени, заблаговременность появления, амплитуда, зависимость от расстояния до эпицентра/размер области аномалии) в некоторых пределах являются неизменными [Pulinets et al., 2003]. Следует отметить, что данное утверждение справедливо с тем ограничением, что в разных регионах отдельные признаки предвестников могут отличаться, как это было обнаружено для регионов Центральной и Южной Италии [Давиденко и Пулинец, 2019].

Самоподобие является основой для “узнаваемости” предвестников. Именно поэтому в названии статьи употребляется термин “когнитивный”, который берет свое начало в психологии, где изучается как человек перерабатывает информацию, анализирует ее и на основе этого принимает решение. Здесь мы этот термин применяем по отношению к машинному анализу информации. Подобно тому, как человек может распознать принадлежность человека к той или другой нации/народности и отличить его в толпе или заметить похожесть близких родственников, удачное графическое представление поведения предвестника во времени позволяет распознать его на фоне других вариаций в ионосфере. Именно так до внедрения машинного анализа проводилось

распознавание образа/маски ионосферного предвестника [Пулинец и Давиденко, 2018; Давиденко и Пулинец, 2019]. Для этого массивы относительных отклонений ПЭС ( $\Delta\text{TEC}$ ) стационарного приемника GPS/ГЛОНАСС формируются в матрицу с распределением вычисленных значений по суткам и часам с последующим визуальным представлением в виде цветного изображения. Цветовая шкала на изображении отражает величину отклонений  $\Delta\text{TEC}$  в процентах. По оси абсцисс откладываются сутки, а по оси ординат – локальное (местное) время (local time – LT) на долготе стационарного приемника GPS/ГЛОНАСС. Для вычисления  $\Delta\text{TEC}$  используется скользящее среднее значение ПЭС (TEC) за предыдущие 15 сут. Эта методология отличается от принятой в исследованиях ионосферы методики, когда исследуемый момент времени помещается в середину интервала вычисленных средних или медианных значений. Ее невозможно применить, поскольку наша технология предполагает ее применение в задачах краткосрочного прогноза землетрясений, и значения ПЭС (TEC) для последующих моментов времени нам еще не известны.

Основной особенностью предвестника является значительное увеличение ПЭС (более 20%) в ионосфере над зоной подготовки землетрясения, проявляющееся в периоды, когда ионосфера не освещена (после прохождения терминатора) и до восхода Солнца. Узнаваемость предвестника связана с характерной формой, похожей на сталактиты и сталагмиты в пещере. Конечно, можно определить сталактиты и сталагмиты с помощью химического анализа, но обычно мы их с легкостью идентифицируем по их внешнему виду, зайдя в пещеру. Точно также и с предвестником: мы можем считать отклонения от среднего, вычислять временные интервалы, когда наблюдалась положительная аномалия, а можем просто взглянуть на изображение маски предвестника и без всяких трудов его идентифицировать. Для этого достаточно взглянуть на график  $\Delta\text{TEC}$  в его традиционном представлении (рис. 2) и на те же данные в формате маски (рис. 3).

При анализе рис. 2 следует сделать следующее замечание к методике расчета  $\Delta\text{TEC}$ . Многие авторы считают этот параметр в абсолютных величинах ПЭС, что приводит к пропускам при обнаружении предвестников. Поскольку ночью абсолютные значения ПЭС могут быть на порядок меньше, чем дневные (что вполне естественно), многие авторы пренебрегают малыми в абсолютном значении величинами ночных отклонений и приходят к неправильным выводам относительно наличия или отсутствия предвестников. С другой стороны, использование  $\Delta\text{TEC}$  в процентах позволяет отфильтровать суточные изменения ПЭС, связанные с изменением уровня ультрафиолето-



**Рис. 2.** Вариации отклонения ПЭС в % ( $\Delta\text{ТЕС}$ ) от скользящего среднего значения за предыдущие 15 суток по данным стационарного приемника lcsb с 1 по 11 января 2018 г. в период подготовки сильного  $M7.5$  землетрясения в Гондурасе. Момент землетрясения на оси абсцисс отмечен треугольником.

вого излучения Солнца, формирующего ионосферу.

Что касается заблаговременности появления предвестников в виде сталактитов/сталагмитов и их похожести, то они появляются в промежутке от 1 до 7 сут до толчка, могут появляться на следующие сутки после толчка, могут проявляться в течение нескольких ночей или через ночь. Раннее появление предвестников может быть связано с наличием сильных форшоков. Тогда появления предвестника следует связывать не с временем основного толчка, а с временем форшока.

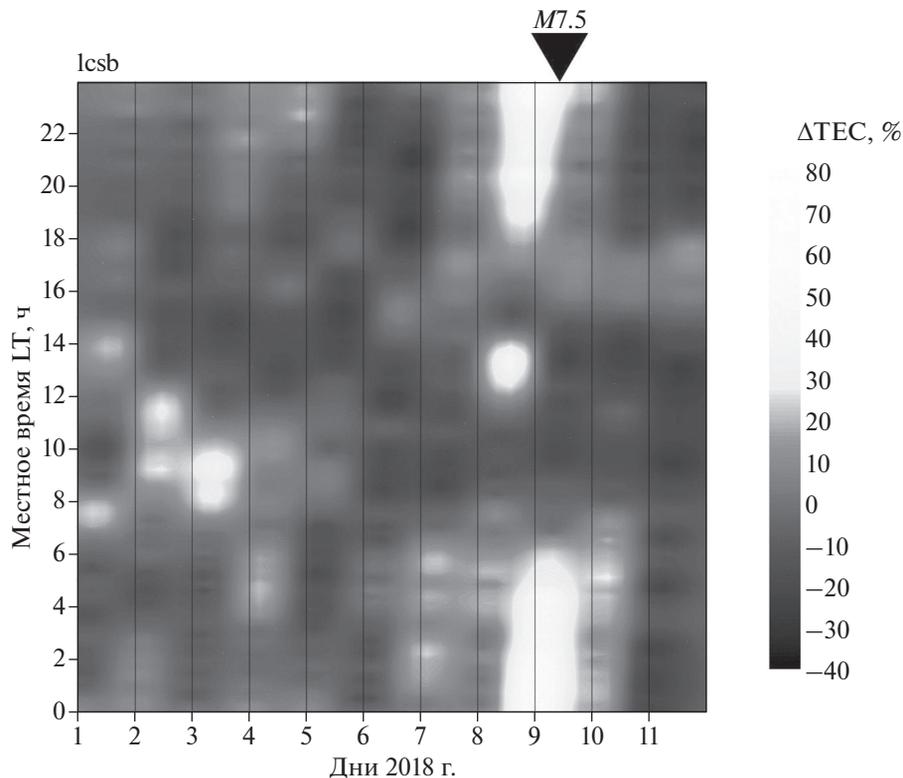
### 3. КАРТИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ

Обязательным элементом проверки факта идентификации предвестника должно стать определение локальности обнаруженной аномалии. Если сам предвестник определяется с помощью приемника/ионосферной станции, наиболее близко расположенной к эпицентру события, то его локальность должна определяться с помощью картирования. Еще в 2003 г. в работе [Pulinets et al., 2003] было показано, что локальность аномального явления в ионосфере является основным необходимым признаком ионосферного предвестника, поэтому построение маски должно сопровождаться построением разностных карт полного электронного содержания над областью подготовки землетрясения. Вдобавок к подтверждению локальности предвестника разностные карты помогают также уточнить положение эпицентра землетрясения, а также его магнитуду.

Фактически, сам процесс оперативного прогноза должен начинаться с картирования, и при обнаружении локальной аномалии необходимо строить маску предвестника по данным приемника, ближайшего к положению максимум аномалии, обнаруженной с помощью картирования.

Сегодня существует несколько возможных вариантов картирования: построение карт с помощью локальной сети стационарных GPS/ГЛОНАСС приемников, как это было сделано для случая землетрясения в Аквиле в 2009 г. [Пулинец и др., 2014], с помощью вертикального зондирования с борта ИСЗ [Пулинец и Легенька, 2003], с помощью высокоорбитальной томографии [Куницын и др., 2005], с помощью глобальных ионосферных карт (Global Ionospheric Maps – GIM), распространяемых International GNSS Service (IGS) в формате IONEX (<ftp://cdis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>), а также с помощью радиозатменного зондирования [Hernández-Pajares et al., 2011].

Несмотря на низкую разрешающую способность карт в формате IONEX, на сегодняшний день они представляют собой наиболее подходящий вариант с точки зрения доступности данных и оперативности. Данные IGS в формате IONEX представляют собой матрицу, элементами которой являются значения ПЭС, умноженные на 10. Разрешение матрицы составляет  $2.5^\circ$  по широте и  $5^\circ$  по долготе. Значения ПЭС рассчитываются IGS каждые 2 ч (в настоящее время осуществляется переход на разрешение по времени в 1 ч). Вычисление и построение разностных карт гло-



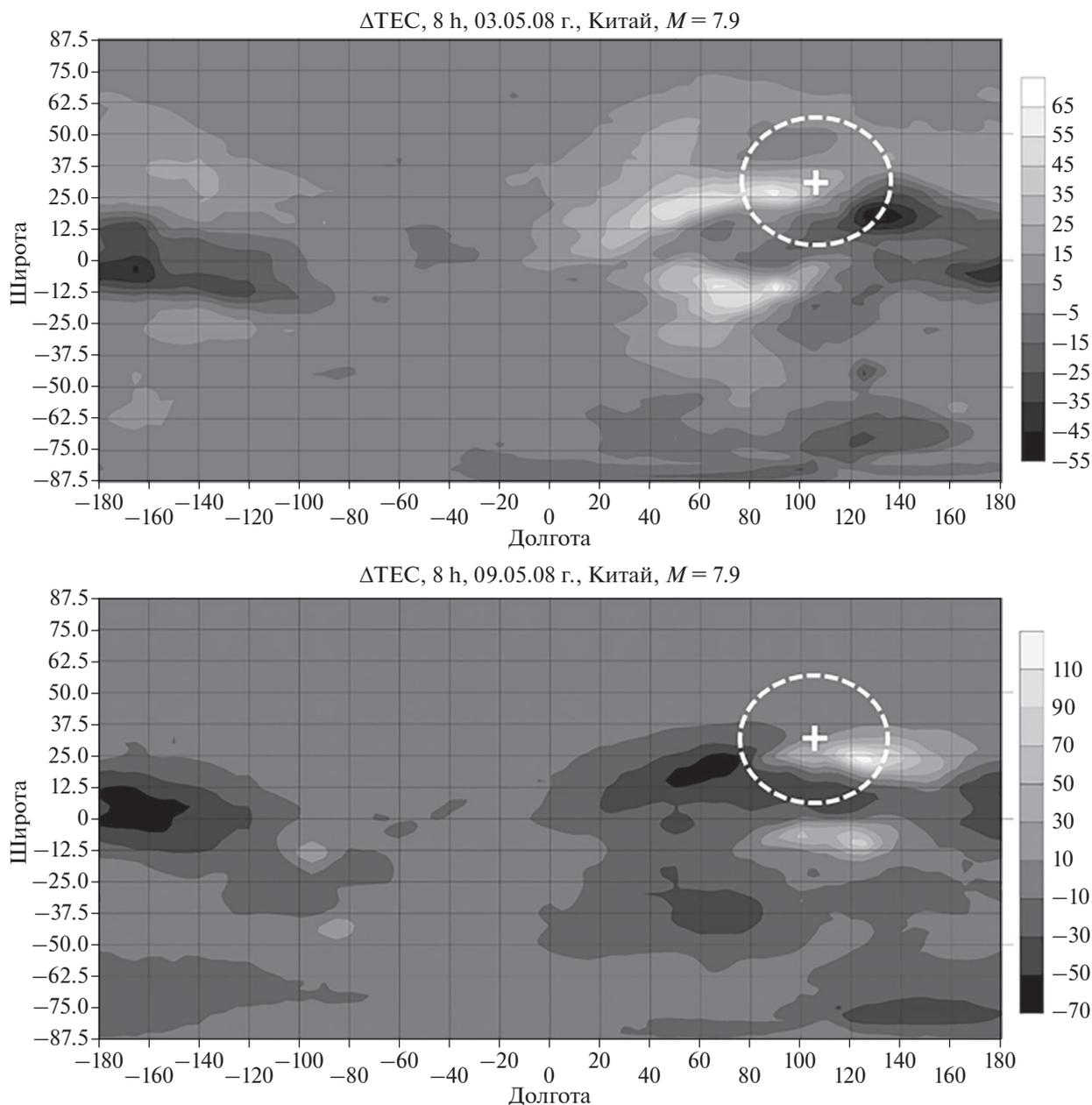
**Рис. 3.** Визуальное представление в формате маски вариаций отклонения ПЭС в % ( $\Delta\text{TEC}$ ) от скользящего среднего значения за предыдущие 15 сут по данным стационарного приемника lcsb с 1 по 11 января 2018 г. в период подготовки сильного  $M7.5$  землетрясения в Гондурасе: ось абсцисс – сутки/дни 2018 г.; ось ординат – местное время на долготе приемника lcsb от 00:00:00 до 23:59:30 LT; тоновая шкала – значения  $\Delta\text{TEC}$ , %.

бального ПЭС  $\Delta\text{TEC}_{\text{GIM}}$ , представляющих собой отклонение текущих значений ПЭС  $\text{TEC}_{\text{GIM}}$  от фоновых  $\text{TEC}_{\text{GIMA}}$ , выполняется по формуле:  $\Delta\text{TEC}_{\text{GIM}} = \text{TEC}_{\text{GIM}} - \text{TEC}_{\text{GIMA}}$ , где в качестве фоновых значений используются скользящие средние значения ПЭС, рассчитанные по 15 предшествующим суткам для того же момента времени. Отклонение от фонового значения выражается в единицах ПЭС (TECU). Примеры разностных карт для различных землетрясений можно найти в [Пулинец и др., 2014; Pulinets and Ouzounov, 2018], а мы сосредоточимся на проблеме определения магнитуд и положения эпицентра по данным разностных GIM карт.

Как было обнаружено еще в 2003 г. [Пулинец и Легенька, 2003] по результатам картирования максимум ионосферной аномалии чаще всего сдвигается в сторону экватора по отношению к положению эпицентра (на юг в северном полушарии и на север – в южном). При этом реакция ионосферы на сейсмогенное электрическое поле обнаруживает долготный эффект, приводящий к тому, что максимум аномалии сдвигается на восток или запад от меридиана эпицентра [Pulinets and Davidenko, 2014; Pulinets et al., 2018]. Это мож-

но увидеть по данным исследования ионосферных эффектов в период подготовки сильного  $M = 7.9$  землетрясения в китайской провинции Сычуань 12 мая 2008 г. [Пулинец и др., 2010]. На рисунке 4 мы видим сначала формирование двух крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации за 6 сут до землетрясения: отрицательной на ЮВ(SE) от эпицентра, и положительной – на ЮЗ(SW) от эпицентра, а потом в той же области картина меняется на противоположную за 3 сут до землетрясения: образуется положительная неоднородность электронной концентрации на SE от эпицентра, и отрицательная неоднородность – на SW от эпицентра. В обоих случаях для положительной аномалии наблюдается магнитосопряженный эффект. Физический механизм этого явления описан в работе [Pulinets et al., 2018]. Такой результат обусловлен динамикой приземных атмосферных процессов в области подготовки, связанных с ионизацией, что отражается в ионосфере вследствие локальной модификации параметров Глобальной Электрической Цепи (ГЭЦ) [Пулинец и др., 2015].

Штриховой линией обозначена зона подготовки землетрясения согласно [Dobrovolsky et al.,

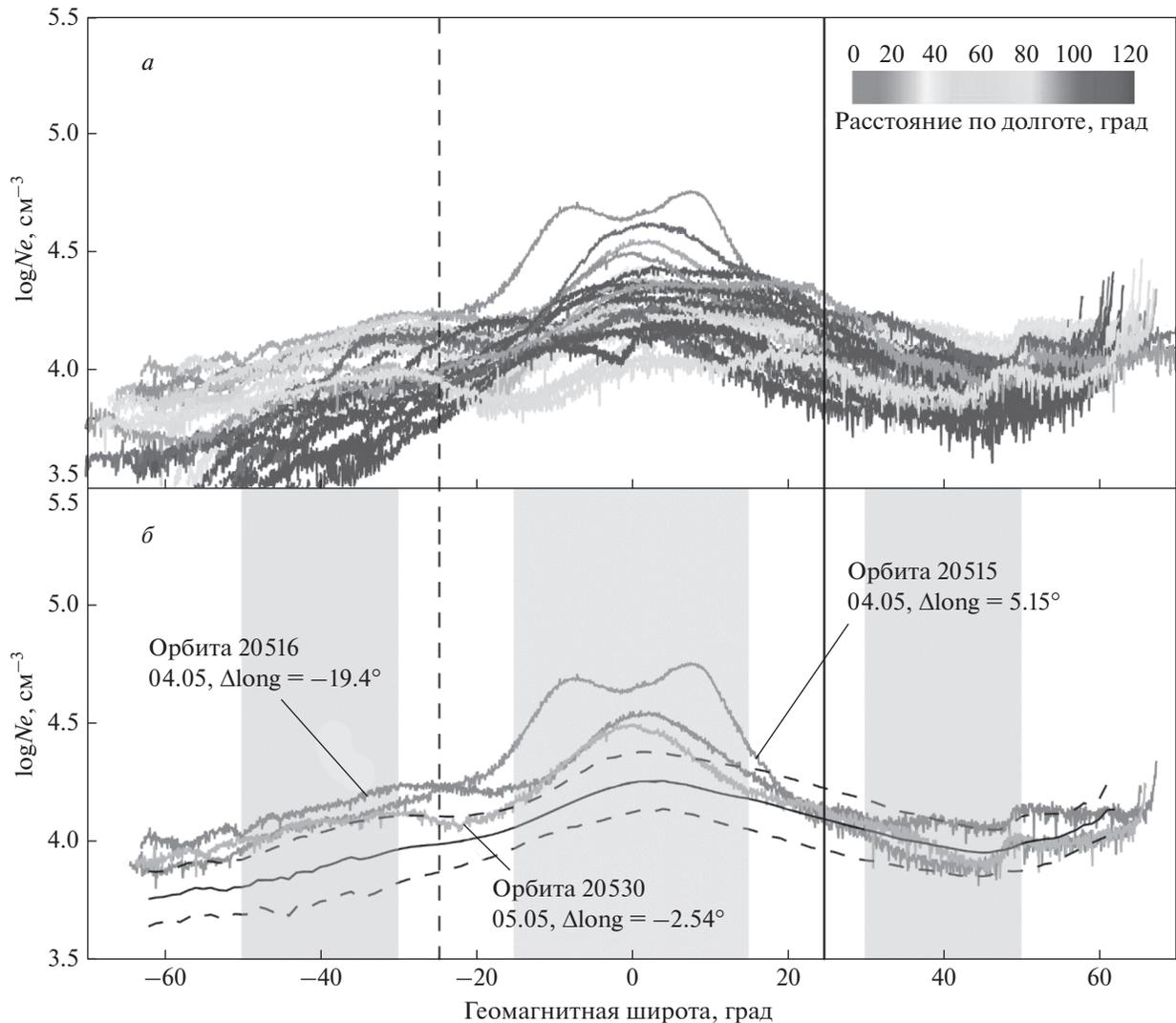


**Рис. 4.** Крупномасштабные неоднородности ПЭС, зарегистрированные 6 (верхняя панель) и 9 мая (нижняя панель) 2008 г. соответственно перед землетрясением  $M7.9$  в провинции Сычуань (КНР) 12 мая 2008 г. Тоновая шкала представлена в единицах 10 TECU.

1979]. Как видно из рис. 4, разностные карты могут обозначить регион готовящегося землетрясения, но положение эпицентра определить по ним весьма проблематично. Необходимо привлечь другие параметры в рамках многопараметрического мониторинга предвестников землетрясений [Ouzoumov et al., 2018a], в том числе пространственное распределение атмосферного химического потенциала [Пулинец и др., 2015], которое наиболее адекватно центрировано относительно положения эпицентра будущего землетрясения.

#### 4. ПОНЯТИЕ АБСОЛЮТНОЙ АНОМАЛИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Изучая различные природные явления, мы осознаем, что все они подчиняются физическим законам, а в более частном случае, законам нашей Солнечной системы, где значительная часть динамических изменений окружающей среды, в том числе, динамика ионосферы, связана с солнечной активностью, куда входят как регулярные вариации (суточные изменения электронной концентрации), так и спорадические изменения, свя-

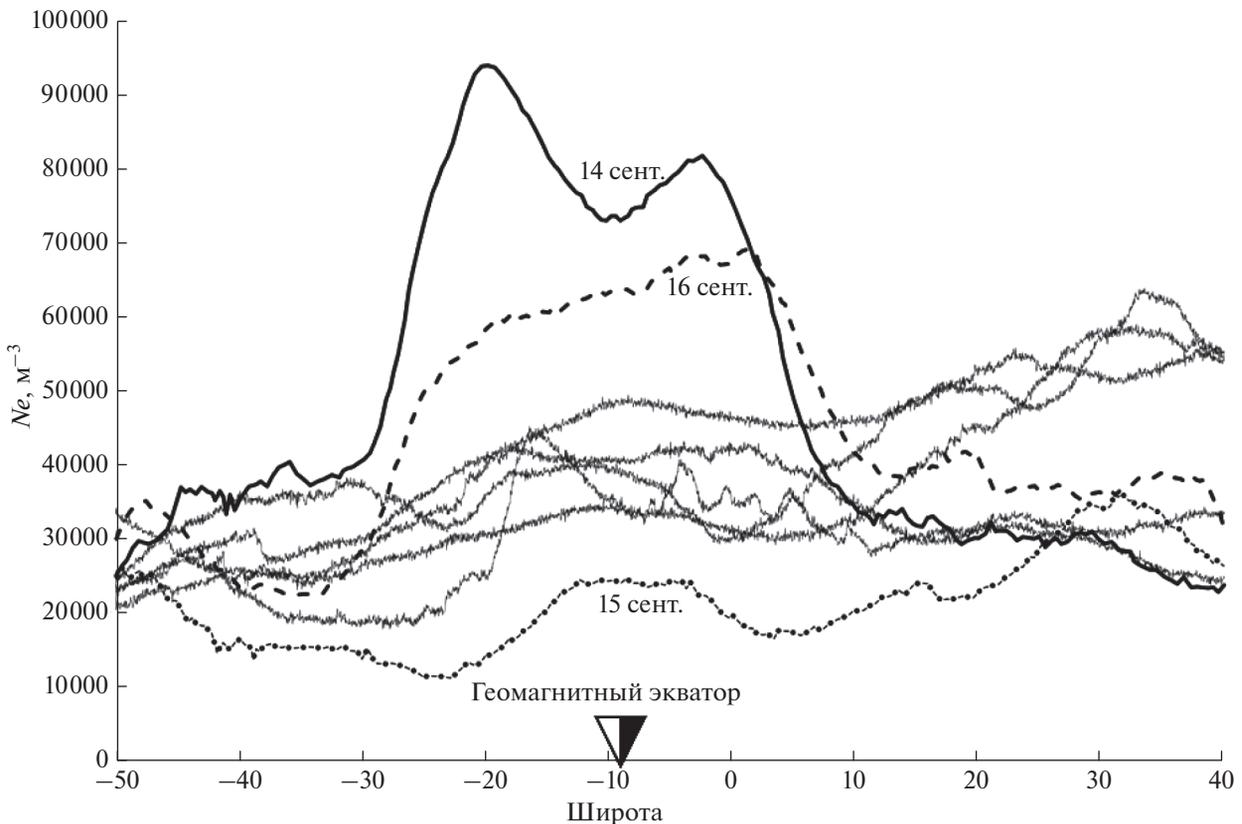


**Рис. 5.** Верхняя панель (а) – широтные профили электронной концентрации по данным зонда Лэнгмюра на спутнике DEMETER за 4–5 мая 2008 г. (дневные орбиты). Расстояние по долготе от эпицентра Венчуаньского землетрясения можно определить по тоновой шкале. Нижняя панель (б) – оставлены только пролеты, ближайшие к эпицентру по долготе. Сплошная черная линия – усредненный профиль по всем пролетам, штриховые линии  $\pm\sigma$ .

занные с активными процессами на Солнце. Одним из наиболее интересных процессов формирования крупномасштабных структур в ионосфере является образование экваториальной аномалии [Kelly and Heelis, 1989]. Появление в послеполуночное время на геомагнитном экваторе электрического поля  $E$ , направленного на восток, благодаря эффекту  $E \times B$  дрейфа ионосферной плазмы (здесь  $B$  – вектор индукции геомагнитного поля) приводит к формированию по обе стороны от геомагнитного экватора областей повышенной электронной концентрации, которые называются горбами экваториальной аномалии. В зависимости от гелиогеофизических условий горбы образуются на расстоянии  $10^\circ$ – $15^\circ$  от геомагнитного экватора. Но самое главное, что элек-

трическое поле, ответственное за генерацию аномалии, появляется только в послеполуночные часы. Поэтому точно также как невозможно ожидать появления Солнца в зените в средних широтах в 03 LT ночи, нельзя ожидать появления экваториальной аномалии ночью или в ранние утренние часы. Тем не менее, на спутнике DEMETER, который находился на солнечно-синхронной орбите с временами прохождения экватора 10 LT–22 LT, при его пролете над областями подготовки землетрясений в утренние часы было отмечено формирование экваториальной аномалии [Ryu et al., 2014] – рис. 5.

Если 10 LT утра в мае можно как-то отнести к дневным часам местного времени, то 5.5 LT утра никак не может быть подходящим временем для



**Рис. 6.** Широтные профили электронной концентрации по данным зонда Лэнгмюра на спутнике SWARM-B вдоль орбит в ранние утренние часы (05:30–06:00 AM) с 30 августа по 16 сентября 2015 г. на долготах, ближайших к долготе эпицентра землетрясений Шapel  $M8.3$  в Чили 16 сентября 2015 г.

образования двугорбой структуры над геомагнитным экватором. Тем не менее, в сентябре 2015 г. при пролете спутника SWARM-B вблизи эпицентра сильнейшего землетрясения Шapel  $M = 8.3$  в Чили за двое суток до землетрясения была зарегистрирована двугорбая структура экваториальной аномалии (рис. 6).

Поскольку в естественных условиях (в смысле, в отсутствие сторонних источников) такая структура никак не может сформироваться, мы должны признать, что в ионосфере было сгенерировано электрическое поле, составляющая которого была направлена на восток. Таким образом, появление двугорбой структуры над геомагнитным экватором в ночное время и ранние утренние часы может стать идеальным предвестником низкоширотных землетрясений. Соответствующая аномалия была названа нами абсолютной.

##### 5. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЦЕЛЯХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В проблеме прогноза землетрясений многопараметрический подход является ключевым эле-

ментом, причем он представляет собой сложную систему, состоящую из различных подсистем. Он включает в себя мониторинг различных физических явлений (электромагнитных полей, метеорологических параметров, параметров ионосферы, параметров сейсмической активности и т.д.), к понятию многопараметричности относится и использование различных источников: можно измерять вертикальные профили температуры воздуха с помощью спутниковых микроволновых зондировщиков, а можно с помощью аэростатов; можно измерять критическую частоту  $foF2$  с помощью наземных станций вертикального зондирования, а можно с помощью спутниковых ионзондов и т.д. И среди этих вложенных одна в другую структур находится такое понятие, как измерение нескольких параметров одной и той же среды, что позволяет идентифицировать предвестник даже в случае, когда один из параметров ведет себя одинаково при разных возмущающих факторах. Именно такой случай мы рассмотрим в данном разделе.

В самом начале исследований ионосферных предвестников землетрясений возникали ожесточенные споры, как отличить вариации электронной плотности, вызванные возмущением ге-

лиогеомагнитной обстановки от вариаций, связанных с подготовкой землетрясений. Если абстрагироваться от того, что было описано в разделе 2, то следует опять обратиться к более полному рассмотрению физических процессов и морфологии этих явлений. Как было установлено [Pulinets et al., 2003], во время геомагнитной бури наблюдается увеличение шкалы высот вертикального профиля электронной концентрации, подобные изменения вертикального профиля наблюдаются также в период подготовки землетрясения над зоной подготовки. Чтобы отличить одно явление от другого, достаточно добавить к этим измерениям измерения электронной температуры. Во время геомагнитной бури электронная температура растет на 2–3 тыс. град, в то время как перед землетрясениями изменения температуры на порядок меньше, если вообще такие наблюдаются. С чем же связаны “вздутия” профиля электронной концентрации перед землетрясениями? Как было показано в [Boškova et al., 1993], а затем было подтверждено данными спутника DEMETER, в слое *F* ионосферы перед землетрясениями над зоной подготовки увеличивается концентрация легких ионов, что приводит к увеличению шкалы высот. Во время геомагнитных бурь изменение шкалы высот происходит за счет увеличения температуры. Таким образом, измерение нескольких ключевых параметров ионосферы (электронной концентрации и температуры, состава и концентрации основных ионосферных ионов), позволяет однозначно идентифицировать предвестники землетрясений в ионосфере.

## 6. ОРГАНИЗАЦИЯ МАШИННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИОНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА В ЦЕЛЯХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для мониторинга состояния ионосферы и идентификации предвестников землетрясений требуется непрерывно обрабатывать данные с большого числа приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и наземных ионозондов вертикального зондирования всемирных и локальных измерительных сетей одновременно с данными о солнечной и геомагнитной активности, данными мониторинга атмосферных параметров. Только их совместный анализ позволяет делать обоснованное заключение о возможности сейсмического события в определенном месте, в определенное время и с определенной магнитудой [Pulinets and Ouzounov, 2018]. Логистика автоматизации обработки данных условно может быть разделена на три этапа: первичная обработка, валидация данных и интеллектуальная обработка, в результате которой, собствен-

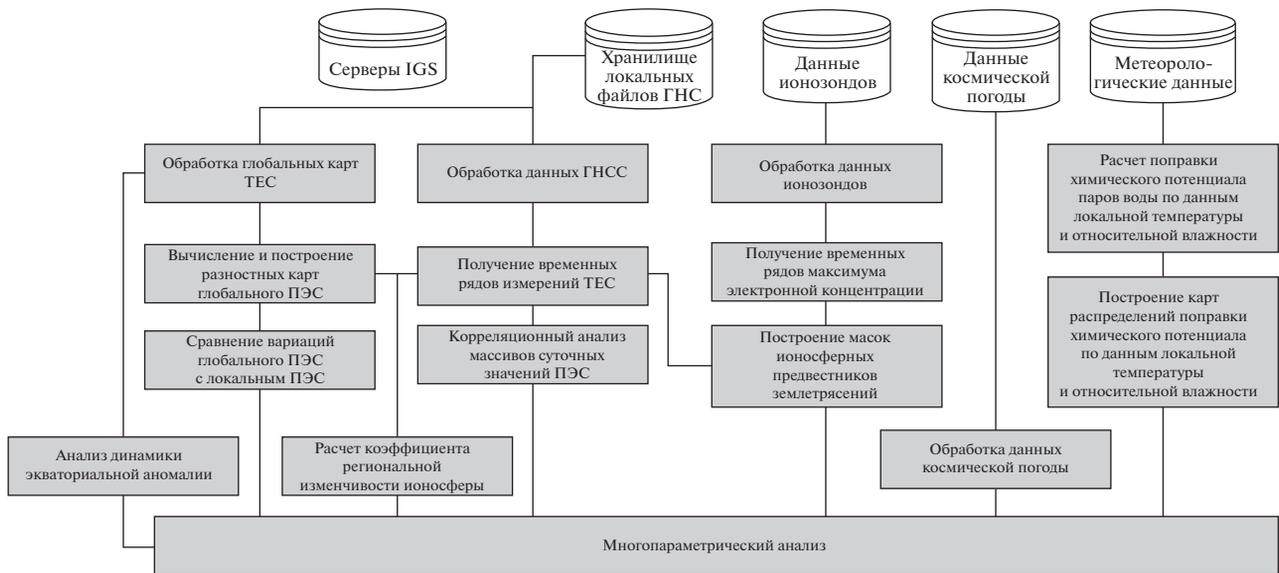
но, и происходит распознавание предвестников. Такое разделение не обязательно обозначает такую же последовательность во времени (какие-то операции могут выполняться одновременно), но помогает понять сам процесс обработки.

В качестве входных данных для мониторинга ионосферной обстановки над сейсмоопасными регионами предлагается использовать данные приемников глобальных навигационных спутниковых систем (GPS/ГЛОНАСС) в формате RINEX (<ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/rinex/>; <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>; <ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex/>), глобальные ионосферные карты (GIM) ПЭС в формате IONEX (<ftp://cddis.nasa.gov/gps/products/ionex/>).

В дополнение к ионосферным данным для анализа гелиогеомагнитной обстановки планируется использовать данные по геомагнитной обстановке – индексы *Ap*, *Kp* и *Dst* (<https://www.gfz-potsdam.de>; [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_realtime/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html)) и данные потока солнечного радиоизлучения *F10.7* ([ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old\\_indices/](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/)), находящиеся в свободном доступе в сети Internet и обновляющиеся в реальном времени.

Одновременно с ионосферными данными для реализации синергетического подхода в соответствии с комплексной моделью литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей [Пулинец и др., 2015; Pulinets et al., 2018] предлагается использовать метеорологические данные (температура и влажность атмосферного воздуха), например, с сайта (<https://meteoinfo.ru/archive-pogoda>), по которым рассчитывается обобщенный параметр, называемый поправкой химического потенциала паров воды в атмосфере [Пулинец и др., 2015]. При наличии других источников данных о готовящемся землетрясении в данном регионе, например, данных дистанционного зондирования о тепловых аномалиях [Ouzounov et al., 2018b], они тоже включаются в процесс интеллектуальной обработки.

Фаза первичной обработки является наиболее затратной по машинному времени, поскольку включает в себя скачивание больших объемов данных с различных источников одновременно. Обычно данные на серверах источников хранятся в запакованном виде, поэтому требуется их распаковка, чтение в формате источника и преобразование к формату, удобному для анализа. При этом необходимо привести данные от разных источников к общему масштабу времени: данные различных геофизических индексов могут предоставляться с разрешением по времени один час, три часа и пр. Данные вертикального зондирования тоже могут быть как с разрешением 15 мин, так и 1 ч, и т.д. В то же время, ПЭС можно рассчитывать как с разрешением 15 с, 30 с, так и с любым



**Рис. 7.** Схема машинной обработки данных ионосферного мониторинга в целях автоматической идентификации предвестников землетрясений.

заданным разрешением через большие интервалы времени.

Не менее важной является фаза валидации. К сожалению, не все приемники работают без сбоев. Бывают целые периоды, когда поступают искаженные данные. Приемник может какое-то время совсем не работать, могут быть выбросы значений далеко за допустимые пределы. Иногда алгоритмы обработки ПЭС дают отрицательные значения, что физически невозможно. Если все это запустить в систему распознавания, то нас будет ждать жестокое разочарование. Поэтому уже на данном этапе необходимо применять достаточно интеллектуальные алгоритмы распознавания сбоев в потоке данных.

Только после приведения данных в надлежащий вид мы можем приступать к машинной обработке. И, если процессы автоматической обработки успешно применяются уже в течение длительного времени, то системы машинного анализа данных, содержащих сложные паттерны, стали популярны в геофизике лишь в последнее время с развитием методов машинного обучения. В настоящее время точность анализа данных с помощью методов искусственного интеллекта не уступает классическим методам [Kim and Nakata, 2018; Alipour et al., 2014], при этом заметно превосходя их в скорости работы и удобстве применения. Среди многочисленных методов машинного обучения для распознавания аномалий наибольшее применение нашли сверточные нейронные сети (convolutional neural network – CNN). Применения данных методов широко распространено в задачах геологоразведки [Das et al., 2019; Sun et al., 2020]. Ряд аналогичных методов

машинного обучения так же применялся для распознавания ионосферных предвестников землетрясений на основе двумерных карт распределения ТЕС [Arıkan and Arıkan, 2018].

Для автоматизированной обработки данных ионосферного мониторинга и анализа ионосферных предвестников предлагается система машинной обработки данных (см. рис. 7), описание которой приводится ниже.

Обработка включает в себя апробированные алгоритмы, в том числе:

1. Анализ массивов данных  $\Delta\text{TEC}$  (или  $\Delta f_oF_2$ ) с применением метода распознавания образов – на соответствие маски ионосферного предвестника текущим изменениям в ионосфере над сейсмоактивным регионом [Пулинец и Давиденко, 2018; Давиденко и Пулинец, 2019].

2. Корреляционный анализ массивов суточных значений ПЭС (ТЕС) (или критической частоты  $f_oF_2$ ) между парой соседних приемников GPS/ГЛОНАСС (или наземных станций вертикального радиозондирования ионосферы) [Pulinets et al., 2004].

3. При наличии густой локальной сети стационарных приемников GPS/ГЛОНАСС расчет коэффициента региональной изменчивости ионосферы [Pulinets et al., 2007].

4. Вычисление и построение разностных карт глобального ПЭС  $\Delta\text{TEC}_{\text{GIM}}$  с целью определения положения эпицентра будущего землетрясения и его магнитуды) [Давиденко, 2013; Пулинец и др., 2014]. При наличии густой локальной сети стационарных приемников GPS/ГЛОНАСС разност-

ные карты могут рассчитываться с помощью локальных данных, а не GPS GIM.

5. Сравнение вариаций глобального ПЭС [Afraimovich et al., 2008] с локальным ПЭС с привязкой к индексу солнечной активности  $F10.7$  [Pulinets and Ouzounov, 2018].

6. Расчет поправки химического потенциала паров воды по данным локальной температуры и относительной влажности для определения времени сейсмического события [Пулинец и др. 2015].

7. Построение карт распределения поправки химического потенциала по данным локальной температуры и относительной влажности для определения положения эпицентра будущего землетрясения и оценки его магнитуды [Pulinets and Ouzounov, 2018].

8. В случае низкоширотных землетрясений анализ динамики экваториальной аномалии (ЭА) с целью обнаружения абсолютной аномалии и долготного эффекта в ЭА [Пулинец и др., 2010, Pulinets and Ouzounov, 2018].

9. Многопараметрический анализ с привлечением оперативных данных о других физических предвестниках при их наличии (активность радона, проводимость земной коры, OLR, аномальные облачные структуры) [Pulinets and Ouzounov, 2018].

В результате анализа оцениваются прогнозируемые значения магнитуды землетрясений для данного региона и их вероятность. На основе прогнозов происходит итоговая оценка вероятности землетрясения на основании данных машинного обучения. При этом не исключается экспертная оценка оператора. Таким образом, в системе осуществляется многофакторный анализ состояния ионосферы, способный распознать уникальный образ предвестника землетрясений.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход основан на многолетнем опыте анализа как ионосферных предвестников землетрясений, так и других физических предвестников, в комплексе создающих обобщенный образ финальной стадии подготовки сильных землетрясений. Создание предлагаемой системы обработки данных ионосферного мониторинга и анализа ионосферных предвестников позволит создать службу прогноза землетрясений, способную распознать и выделить ионосферные вариации, являющиеся предвестниками землетрясений, в автоматическом режиме.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 075-11-2019-015 от “22” октября 2019 г. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58519X0008.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гольдин С.В. Физика “живой” Земли / Проблемы геофизики XXI в. М.: Наука. С. 17–36. 2003.
- 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. Т. 59. № 4. С. 529–544. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016794019040084>
- Золотов О.В. Эффекты землетрясений в вариациях полного электронного содержания ионосферы. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. Мурманск, МГТУ, 20 с. 2015.
- Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем // Вестн. МГУ. № 1. С. 74–84. 2005.
- Николаев А.В. Черты геофизики XXI в. / Проблемы геофизики XXI в. М.: Наука. С. 7–16. 2003.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д. Динамика приэкваториальной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 2. С. 239–244. 2002.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д. Пространственно-временные характеристики крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации, наблюдаемых в области  $F$  ионосферы перед сильными землетрясениями // Космич. исслед. Т. 41. № 3. С. 221–229. 2003.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя  $F$  от местного времени // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 3. С. 188–193. 1998.
- Пулинец С.А., В.Г. Бондур, М.Н. Цидилина, М.В. Гапонова. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 2. С. 240–252. 2010.
- 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, 144 с. 2014.
- 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 аэрономия. Т. 55. № 4. С. 540–558. 2015.
- Пулинец С.А., Давиденко Д.В. Положительная ночная аномалия электронной концентрации в ионосфере как краткосрочный предвестник землетрясений и возможный физический механизм ее формирования // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 4. С. 579–591.

2018.  
<https://doi.org/10.1134/S0016794018040120>
- *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Y.V., Zhivetiev I.V.* Global electron content: A new conception to track solar activity. // *Ann. Geophys.* V. 26. P. 335–344. 2008.
- *Alipour A., Yarahmadi J., Mahdavi M.* Comparative study of M5 model tree and artificial neural network in estimating reference evapotranspiration using MODIS products // *J. Climatology.* V. 2014. Article ID 839205. 11 p. 2014.  
<https://doi.org/10.1155/2014/839205>
- *Arikan O., Arikan F.* Machine learning based detection of earthquake precursors using ionospheric data / 42nd CO-SPAR Scientific Assembly. Held 14–22 July 2018, in Pasadena, California, USA, Abstract id. C1.4-16-18 18.
- *Bošková J., Šmilauer J., Jiříček F., Tříška P.* Is the ion composition of outer ionosphere related to seismic activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 55. № 13. P. 1689–1695. 1993.
- *Cushman-Roisin B.* Atmospheric boundary layer / Environmental fluid mechanics. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, Inc. P. 165–186. 2014.
- *Das V., Pollack A., Wollner U., Mukerji T.* Convolutional neural network for seismic impedance inversion // *Geophysics.* V. 84. № 6. 2019.  
<https://doi.org/10.1190/geo2018-0838.1>
- *Davies K., Baker D.M.* Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28 1964 // *J. Geophys. Res.* V. 70. P. 2251–2253. 1965.
- *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pure Appl. Geophys.* V. 117. № 5. P. 1025–1044. 1979.
- *Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J. et al.* The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques // *J. Geod.* V. 85. P. 887–907. 2011.  
<https://doi.org/10.1007/s00190-011-0508-5>
- *Kelley M.C., Heelis R.A.* The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics. San Diego, New York, Toronto: Academic Press Inc., 485 p. 1989.
- *Kim Y., Nakata N.* Geophysical inversion versus machine learning in inverse problems // *The Leading Edge.* V. 37. P. 866–944. 2018.
- *Kon S., Nishihashi M., Hattori K.* Ionospheric anomalies possibly associated with  $M \geq 6.0$  earthquakes in the Japan area during 1998–2010: Case studies and statistical study // *J. Asian Earth Sci.* V. 41. P. 410–420. 2011.
- *Le H., Liu J.Y., Liu L.* A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736  $M6.0+$  earthquakes during 2002–2010 // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A02303. 2011.  
<https://doi.org/10.1029/2010JA015781>
- *Liu J.Y., Chen Y.I., Jhuang H.K., Lin Y.H.* Ionospheric  $foF2$  and TEC anomalous days associated with  $M \geq 5.0$  earthquakes in Taiwan during 1997–1999 // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* V. 15. № 3. P. 371–383. 2004.
- *Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.* A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A05304. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2005JA011333>
- *Liu, J.Y., Chen Y.I., Chen C.H. et al.* Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008  $Mw7.9$  Wenchuan earthquake // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A04320. 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2008JA013698>
- *Ouzounov D., Pulinets S., Liu J.Y. et al.* Multiparameter assessment of pre-earthquake atmospheric signals / Pre-earthquake processes: A multidisciplinary approach to earthquake prediction studies. Editors: D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor. Publisher: AGU/Wiley. P. 339–359. 2018a.
- *Ouzounov D., Pulinets S., Kafatos M., Taylor P.* Thermal radiation anomalies associated with major earthquakes / Pre-earthquake processes: A multidisciplinary approach to earthquake prediction studies. Editors: D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor. Publisher: AGU/Wiley. P. 259–274. 2018b.
- *Pulinets S.A.* Seismic activity as a source of the ionospheric variability // *Adv. Space Res.* V. 22. № 6. P. 903–906. 1998.  
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(98\)00121-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(98)00121-5)
- *Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh.* Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 65. P. 1337–1347. 2003.
- *Pulinets S.A., Gaivoronska T.B., Leyva Contreras A., Cirraolo L.* Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes // *Nat. Hazard. Earth Sys.* V. 4. P. 697–702. 2004.
- *Pulinets S.A., Kotsarenko A.N., Cirraolo L., Pulinets I.A.* Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 970–977. 2007.
- *Pulinets S., Davidenko D.* Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit // *Adv. Space Res.* V. 53. № 5. P. 709–723. 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
- *Pulinets S., Ouzounov D.* The possibility of earthquake forecasting learning from nature. IOP Publishing, Bristol, UK, 167 p. 2018.  
<https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1248-6>
- *Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Davidenko D.* Lithosphere–atmosphere–ionosphere–magnetosphere coupling – a concept for pre-earthquake signals generation / Pre-earthquake processes: a multidisciplinary approach to earthquake prediction studies. Editors: D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor. Publisher: AGU/Wiley. P. 79–98. 2018.
- *Ryu K., Parrot M., Kim S.G., Jeong K.S., Chae J.S., Pulinets S., Oyama K.-I.* Suspected seismo-ionospheric coupling observed by satellite measurements and GPS TEC related to the  $M7.9$  Wenchuan earthquake of 12 May 2008 // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 11. P. 10305–10323. 2014.
- *Sun J., Slang S., Elboth T., Larsen Greiner T., McDonald S., Gelius L.-J.* A convolutional neural network approach to deblending seismic data // *Geophysics.* V. 85. № 4. 2020.  
<https://doi.org/10.1190/geo2019-0173.1>