

УДК 528.88(15) EDN PKINNE

Автоматизация процессов идентификации краткосрочных предвестников сильных землетрясений

С. А. Пулинец, д.ф.-м.н., *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. А. Алексеев, д.т.н., профессор, *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Д. Линьков, к.э.н., *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Н. В. Разумова, к.г.н., доцент, *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. Ю. Калинин, к.т.н., *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются результаты и перспективы автоматизации процессов идентификации краткосрочных предвестников сильных (с магнитудой 6 и более) землетрясений, регистрируемых с помощью спутниковых измерений. Автоматизация этих процессов опирается на их формализацию, в основе которой лежит разработанная в России физическая модель генерации предвестников землетрясения — модель литосферно-атмосферно-ионосферных взаимодействий в области подготовки землетрясения. На основе многолетнего опыта мониторинга предвестников различной физической природы в качестве основных предвестников землетрясений предлагается использование ионосферных и тепловых/метеорологических аномалий, регистрируемых за несколько суток до сейсмического события над зоной подготовки землетрясения, как наиболее достоверных. В статье описана формализация связей параметров прогнозируемых землетрясений и параметров их наблюдаемых предвестников, предложены этапы машинной обработки данных о выбранных предвестниках землетрясений, определены направления повышения уровня автоматизации процессов идентификации предвестников землетрясений на основе методов машинного обучения их распознавания.

Ключевые слова: землетрясение, краткосрочные предвестники, ионосфера, тепловые аномалии

Automation of Identification Processes Short-Term Precursors of Strong Earthquakes

S. A. Pulinets, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

O. A. Alekseev, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. D. Linkov, *Cand. Sci. (Econ.), centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

N. V. Razumova, *Cand. Sci. (Geography), Assoc. Prof., centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. Yu. Kalinin, *Cand. Sci. (Engineering), centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article studies the results and prospects for automating the identification of short-term precursors of strong (magnitude 6 or more) earthquakes recorded using satellite measurements. Automation of these processes is based on their formalization, which is based on a physical model for the generation of earthquake precursors developed in Russia — a model of lithospheric-atmospheric-ionospheric interactions in the area of the imminent earthquake. Based on many years of experience in monitoring of various physical precursors, it is proposed to use ionospheric and thermal/meteorological anomalies recorded several days before a seismic event over the earthquake preparation zone as the most reliable ones as the main precursors of earthquakes. The article describes the formalization of the connections between the parameters of predicted earthquakes and the parameters of their observed precursors, proposes stages of machine processing of data on selected earthquake precursors, and identifies directions for increasing the level of automation of the processes of identifying earthquake precursors based on machine learning methods for their recognition.

Keywords: earthquake, short-term precursors, ionosphere, thermal anomalies

Введение

Среди стихийных бедствий глобального характера, выражающихся в виде материального ущерба и гибели людей, землетрясения по своим последствиям занимают второе место после наводнений. Причем иногда эти последствия достигают поистине чудовищных масштабов: общее количество жертв землетрясения в Индонезии с магнитудой 9,3 вблизи острова Суматра 26 декабря 2005 г. и последовавшим за ним цунами оценивается в 235 тысяч человек; землетрясение в Турции и Сирии 6 февраля 2023 г. с магнитудой 7,8 унесло жизни порядка 60 тысяч человек.

Основным фактором, приводящим к таким последствиям, является внезапность землетрясений, связанная с отсутствием прогнозов сейсмических событий. На сегодняшний день отсутствуют технологии, официально признанные научным сообществом, а также официально признанные на государственном уровне, которые позволяли бы заблаговременно определять место, время и магнитуду будущего сейсмического события.

В течение последних десятилетий были проведены исследования, доказывающие существование физических аномалий в атмосфере и ионосфере над областью готовящегося сильного землетрясения, была создана физическая модель генерации аномалий, предвещающих землетрясения [1], были разработаны подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным [2].

В результате выполнения работы были выбраны наиболее надежные краткосрочные предвестники землетрясений, разработаны технологии их регистрации и идентификации [3]. Опираясь на полученные результаты, разработали концепцию создания спутниковой системы мониторинга природных и техногенных катастроф [4], а для ее проверки были организованы работы по созданию макета информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений в Камчатско-Сахалинском регионе [5]. Одновременно в рамках международной кооперации разрабатывалась концепция многопараметрического сетевого мониторинга предвестников землетрясений различной

физической природы с помощью разных методов спутниковых измерений предвестников землетрясений [6]. Результаты испытания макета информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений докладывались на IV Международной конференции в КНР, посвященной спутниковым исследованиям предвестников землетрясений с помощью китайского сейсмо-электромагнитного спутника CSES [7, 8], где были подтверждены возможности обнаружения ионосферных предвестников землетрясений, в том числе с помощью измерений на китайском спутнике.

Технология информационного сервиса, разработанная в результате выполнения проекта [5], имела невысокий уровень автоматизации на этапах идентификации предвестников землетрясений и определения их параметров при формировании прогнозов землетрясений, что требовало участия в этих процессах высококвалифицированных экспертов и операторов с высоким уровнем профессиональной подготовки. Поэтому были продолжены исследования и разработки по повышению уровня автоматизации процесса идентификации предвестников землетрясений при использовании методов машинного обучения их распознавания [9].

Использование феноменологических характеристик предвестников землетрясений для определения основных параметров сейсмического события

Для того, чтобы определить основные особенности предвестников землетрясений в атмосфере и ионосфере, потребовались многолетние исследования [10, 11], которые позволили установить основные морфологические характеристики предвестников, а также разработать методы определения основных параметров прогноза: места, времени и магнитуды будущего сейсмического события с погрешностями, допустимыми для практического использования прогнозных параметров. Так, координаты ожидаемого землетрясения определяются с погрешностью $\pm 1^\circ$ по широте и долготе, время ожидания сейсмического события находится

в пределах 1–10 сут до землетрясения, а ожидаемая магнитуда M определяется с погрешностью $\pm 0,5$ баллов по шкале Рихтера [5]. Вместе с тем в большинстве случаев для определения значений прогнозных параметров с допустимыми погрешностями требуется экспертное заключение высококвалифицированного оператора.

Уменьшение влияния человеческого фактора на снижение качества (своевременность и точность) прогнозов землетрясений видится на пути глубокой автоматизации процесса идентификации их предвестников. Для этого следует определить их характерные признаки, т. е. создать «портрет» предвестника, который можно заложить в программу автоматического распознавания. Это возможно при одном условии: если во всех случаях различных землетрясений «портреты» предвестников похожи. Здесь следует сказать, что процесс подготовки землетрясения является процессом приближения к критической точке состояния зоны готовящегося землетрясения, а их распределение описывается степенным законом, называемым распределением Гутенберга–Рихтера. В физике степенные законы распределения типичны для критических процессов, которые также принято называть самоподобными, потому что в них отсутствует какой-либо выделенный размер. В нашем случае, независимо от магнитуды и места землетрясения, поведения предвестников будут подобны, что как раз и позволяет выделить их из ансамбля других проявлений изменчивости среды. Таким образом, мы можем осуществить визуализацию предвестника, которая является ключом к пониманию и интерпретации результатов измерений.

В случае ионосферных предвестников одним из характерных признаков является положительная ночная аномалия, которая имеет вид, представленный на рис. 1.

Изображение получено путем усреднения данных по землетрясениям в Греции за период 2006–2011 гг. с магнитудой $M \geq 6$ [12]. По вертикальной оси показано местное время суток, а по горизонтальной — сутки, отсчитываемые от дня землетрясения, отмеченного на рисунке цифрой 0. Как видим, аномалия появляется в послеполуденные часы за сутки до землетрясения, длится всю ночь до 5 утра в день землетрясения.

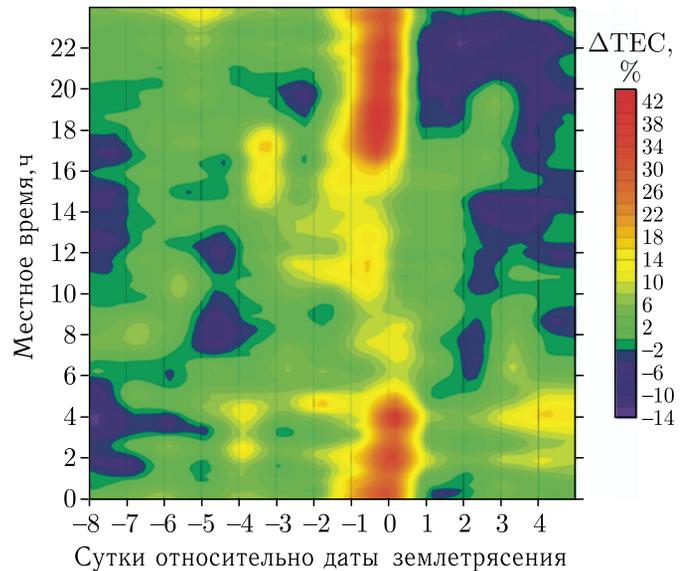


Рис. 1. Положительная ночная аномалия, полученная методом наложения эпох, для землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ в Греции

Вместе с тем статистический анализ данных о 5742 мелкофокусных землетрясениях с магнитудой $M \geq 5$, полученных при обработке ионосферных измерений на французском спутнике DEMETER при его функционировании на орбите с 2004 по 2010 г. [13], показывает, что время упреждения появления аномалии перед землетрясением может меняться от 1 до 10 сут. При этом наибольший статистический вес имеют землетрясения с временем упреждения 5 сут.

Следует отметить, что в течение развития финальной фазы подготовки землетрясения, в зависимости от знака аномального электрического поля в зоне подготовки землетрясения, появляющиеся в ионосфере аномалии могут быть как положительными, так и отрицательными, что видно на рис. 2 [14], где представлены предвестники Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. с магнитудой $M = 6,3$. Как видно из рисунка, вертикальная проекция положения эпицентра землетрясения находится вблизи центра регистрируемой ионосферной аномалии, что позволяет в ходе обработки осуществлять обратную проекцию центра аномалии на поверхность Земли и определять координаты готовящегося землетрясения.

Причиной образования аномалий в ионосфере перед землетрясениями является модификация

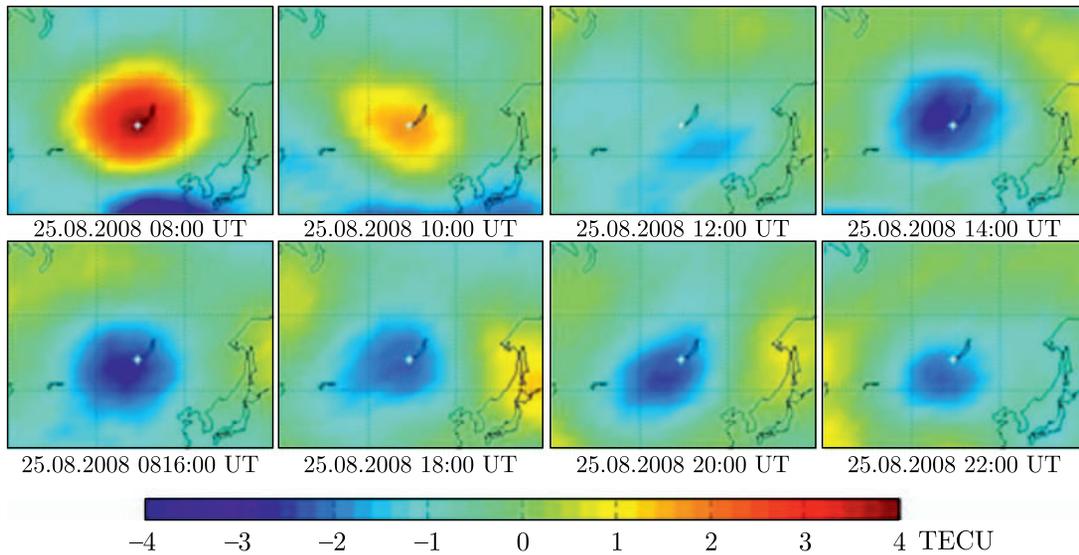


Рис. 2. Динамика ионосферной аномалии, регистрируемой над зоной подготовки Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. магнитудой $M = 6,3$. Положение эпицентра отмечено белым крестом

электрических свойств приземного слоя атмосферы вследствие его ионизации альфа-излучением радона, истекающего из активных тектонических разломов в зоне подготовки землетрясений [15].

Ионизация приводит также к воздействию на термодинамику приземного слоя, вызывая формирование крупномасштабных аномалий всех метеорологических параметров: температуры, относительной влажности и давления [1, 16]. Ионы, создаваемые радонами, вступают в плазмохимические реакции и формируют сложные соединения, оставаясь при этом электрически заряженными. За счет их взрывной гидратации резко падает влажность и поднимается температура благодаря выделению скрытого тепла, формируемого молекулами водяного пара, осевшими на ионах. С падением влажности падает парциальное давление паров воды, а с ним и общее давление.

Пример такого случая показан на рис. 3 для землетрясения магнитудой $M = 6,0$ вблизи Крита 27 сентября 2021 г. [17].

График давления (коричневая кривая) требует отдельного пояснения. Помимо натуральных вариаций давления, связанных с изменениями погоды, мы видим небольшой провал давления, совпадающий по времени с интенсивными вариациями температуры и относительной влажности. Этот провал отражает падение парциального давления водяного пара за счет падения относительной влажности.

Верхняя кривая на рисунке отображает интегральный параметр ACP (эВ), называемый атмосферным химическим потенциалом, выражаемый через температуру воздуха T_g у поверхности Земли и относительную влажность воздуха H :

$$ACP \text{ (эВ)} = 5,8 \cdot 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln(100/H). \quad (1)$$

Параметр ACP (эВ) характеризует активность радона в данной точке [1]. Именно этот параметр мы будем использовать в дальнейшем для идентификации процесса подготовки землетрясения совместно с вариациями относительной влажности как наиболее надежных краткосрочных предвестников, что было установлено в результате статистического анализа [16]. На рис. 4 показаны вариации этих параметров.

Совершенно очевидно, что осенью (это Южное полушарие) в открытом океане относительная влажность в 1%, зарегистрированная в минимуме на нижней кривой рис. 6, в естественных условиях без специального воздействия абсолютно невозможна.

Максимальный размер аномалии соответствует размеру зоны подготовки землетрясения, радиус которой определяется формулой Добровольского, где R — радиус зоны подготовки в км, а M — магнитуда землетрясения по шкале Рихтера [18]:

$$R = 10^{0,43M}. \quad (2)$$

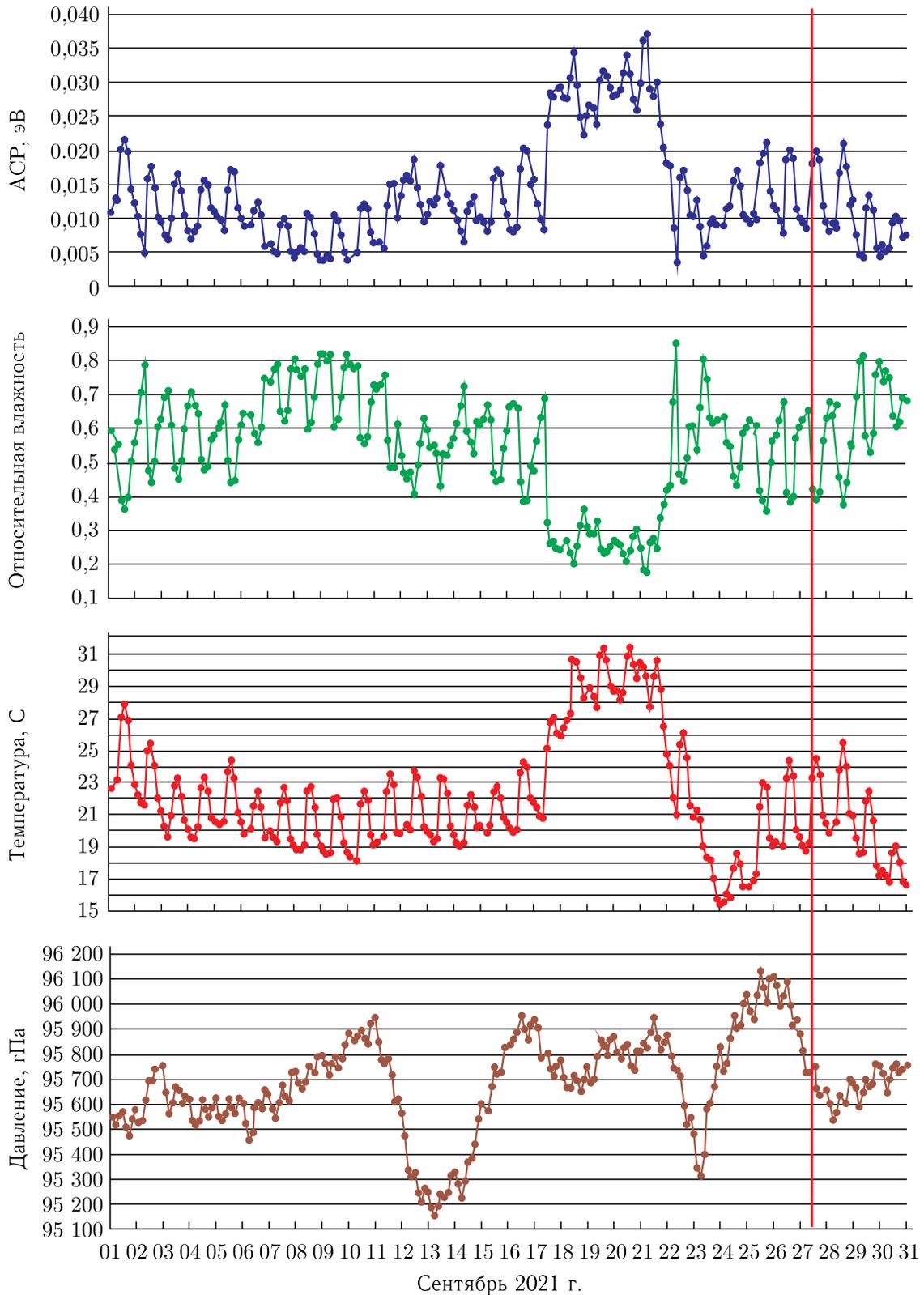


Рис. 3. Сверху вниз: атмосферный химический потенциал, относительная влажность, температура воздуха, атмосферное давление. Динамика метеорологических параметров над эпицентром готовящегося землетрясения $M = 6,0$ на Крите 27 сентября 2021 г.

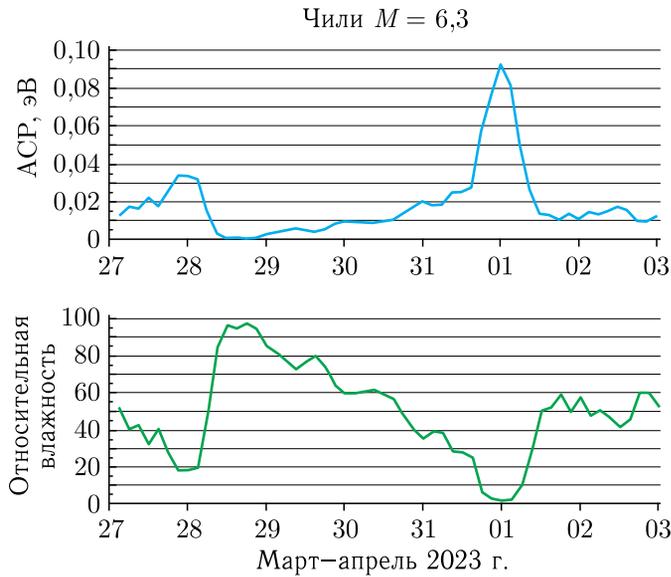


Рис. 4. Верхняя панель — вариации химического потенциала, нижняя панель — вариации относительной влажности в период подготовки землетрясения 1 апреля 2023 г. у побережья Чили с магнитудой $M = 6,3$

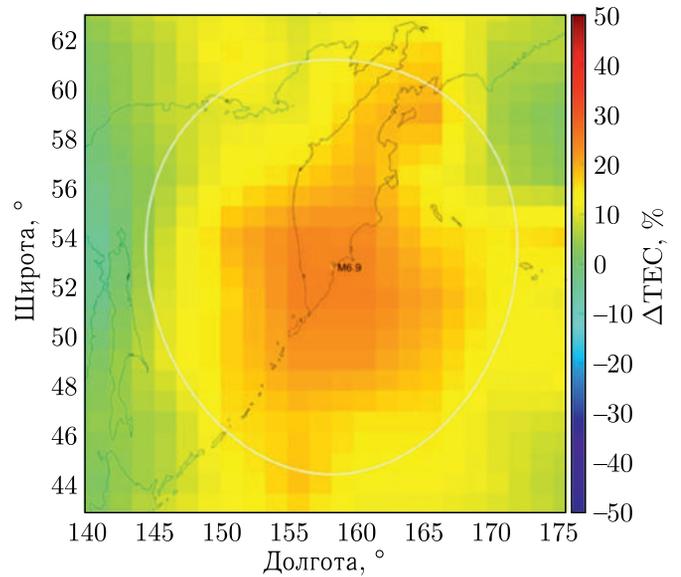


Рис. 5. Ионосферная аномалия, зарегистрированная за 4 сут до землетрясения на Камчатке 3 апреля 2023 г. магнитудой $M = 6,9$. Положение эпицентра отмечено желтой звездой

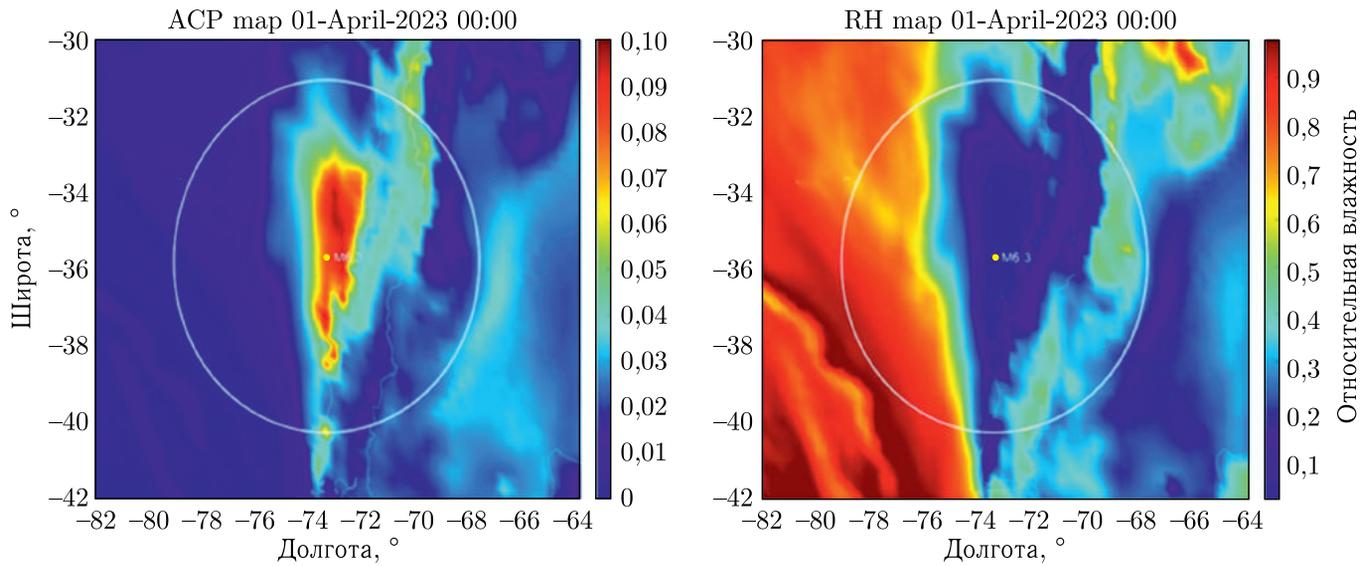


Рис. 6. Левая панель — карта распределения атмосферного химического потенциала, правая панель — карта распределения относительной влажности. Положение эпицентра отмечено желтой звездой. Белый круг обозначает зону подготовки землетрясения согласно выражению (2)

Таким образом, зная R , мы можем оценить магнитуду готовящегося землетрясения:

$$M = \lg(R)/0,43. \quad (3)$$

На рис. 5 представлена ионосферная аномалия, зарегистрированная за 4 сут до землетрясения магнитудой $M = 6,9$ на Камчатке 3 апреля 2023 г.

Белый круг обозначает зону подготовки землетрясения согласно формуле (2).

На рис. 6 приведены карты распределений аномалий атмосферного химического потенциала и относительной влажности воздуха перед землетрясением с магнитудой $M = 6,3$ у побережья Мауле в Чили 1 апреля 2023 г.

Средства автоматизации процессов идентификации ионосферных и атмосферных предвестников землетрясений

В настоящее время точность анализа данных с помощью методов машинного обучения не уступает классическим методам [19, 20], 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). Применение данных методов широко распространено в задачах геологоразведки [21, 22]. Ряд аналогичных методов машинного обучения также применялся для распознавания ионосферных предвестников землетрясений на основе двумерных карт распределения полного электронного содержания (ПЭС) TEC [23].

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

Обработка включает в себя апробированные алгоритмы, в том числе:

— анализ массивов данных вариаций ПЭС ΔTEC (или $\Delta foF2$) с применением метода рас-

познавания образов — на соответствие маски ионосферного предвестника текущим изменениям в ионосфере над сейсмоактивным регионом [12];

— корреляционный анализ массивов суточных значений ПЭС TEC (или критической частоты $foF2$) между парой соседних приемников GPS/ГЛОНАСС (или наземных станций вертикального радиозондирования ионосферы) [24];

— расчет коэффициента региональной изменчивости ионосферы при наличии густой локальной сети стационарных приемников GPS/ГЛОНАСС [25];

— вычисление и построение разностных карт вариаций глобального ПЭС ΔTEC_{GIM} с целью определения положения эпицентра будущего землетрясения и его магнитуды [3]. При наличии густой локальной сети стационарных приемников GPS/ГЛОНАСС разностные карты могут рассчитываться с помощью локальных данных, а не GPS GIM;

— сравнение вариаций глобального ПЭС с локальным ПЭС с привязкой к индексу солнечной активности $F10,7$ [26];

— расчет поправки химического потенциала паров воды по данным локальной температуры и относительной влажности для определения времени сейсмического события [1];

— построение карт распределения поправки химического потенциала по данным локальной

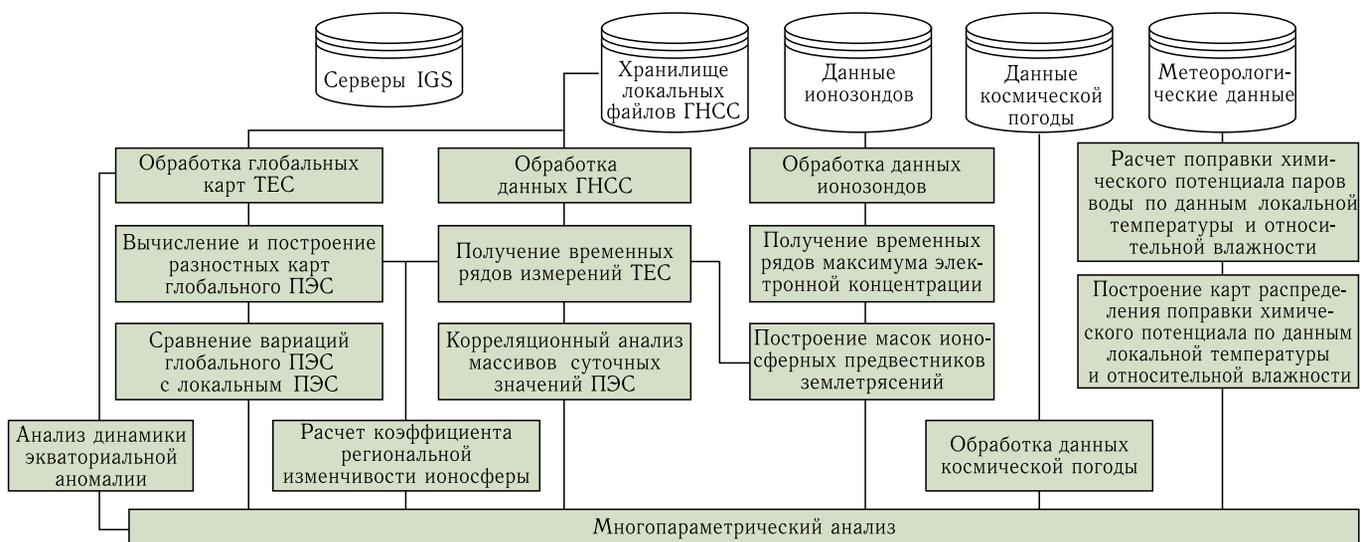


Рис. 7. Схема машинной обработки данных ионосферного мониторинга в целях автоматизированной идентификации предвестников землетрясений

температуры и относительной влажности для определения положения эпицентра будущего землетрясения и оценки его магнитуды [14];

— анализ динамики экваториальной аномалии (ЭА) в случае низкоширотных землетрясений с целью обнаружения абсолютной аномалии и долгого эффекта в ЭА [14, 27];

— многопараметрический анализ с привлечением оперативных данных о других физических предвестниках при их наличии (активность радона, проводимость земной коры, OLR, аномальные облачные структуры) [14].

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

Для автоматизированной (вплоть до автоматической) обработки данных по атмосферным предвестникам землетрясений применима другая схема, учитывающая высокую изменчивость метеорологических условий: ветры, осадки, прохождение атмосферных фронтов, циклоны и антициклоны, ураганы и пр. Основным источником для расчета поправки атмосферного химического потенциала является ассимилятивная модель атмосферы GEOS-FP, разработанная Управлением глобального моделирования и ассимиляции NASA (<https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/gmao/geos-fp/das>). Атмосферные данные представлены на 80 высотных уровнях, из которых выбираются данные по приземному слою атмосферы. Чтобы избежать помех, создаваемых обтеканием рельефа, для расчета выбираются данные на высотах 100 и 250 м от земной поверхности. Кроме того, необходимы сформированные в режиме, близком к режиму реального времени, спутниковые карты распределения ветров и мезомасштабных атмосферных формирований типа циклонов или ураганов.

Еще одной особенностью обработки атмосферных данных является необходимость их районирования. Учитывая, что источником предвестниково-

го эффекта является радон, а глобальное распределение его активности весьма неоднородно, типичные значения величины поправки атмосферного химического потенциала в разных регионах земли могут отличаться на несколько порядков. Приходится принимать во внимание и климатические различия: регионы с высокой и низкой влажностью, снежный покров, суша и океан, сезонные изменения и пр.

И, наконец, еще один критерий — неподвижность источника. Реальная аномалия появляется в зоне подготовки землетрясения, зарождающаяся как бы ниоткуда, в отличие от других атмосферных эффектов, для которых характерно движение в направлении ветра. Источниками радона являются активные тектонические разломы, которых может быть несколько внутри зоны подготовки, что может создавать мозаичную картину активности, тем не менее вся эта активность остается внутри зоны подготовки. Таким образом, одной из наиболее сложных задач обработки является создание маски неподвижности предвестниковой аномалии.

Таким образом, процедуру идентификации атмосферных предвестников можно разделить на следующие этапы:

- создание базы данных на выбранной высоте на основе ассимилятивной модели атмосферы;
- создание карты ветров и движущихся мезомасштабных структур;
- разделение поверхности Земли на зоны с типичным значением *АСР*;
- построение карт распределения *АСР*, относительной влажности, температуры и давления;
- идентификация предвестниковых атмосферных аномалий на основе маски неподвижности;
- построение графиков вариаций *АСР*, относительной влажности, температуры и давления;
- оценка корреляций с данными по ионосферным предвестникам.

Определение параметров готовящегося землетрясения проводится по процедуре, подобной проводимой по ионосферным данным:

- время возможного землетрясения определяется по статистическим данным о предыдущих землетрясениях из графиков временной зависимости *АСР* и составляет от 1 до 10 суток;

— магнитуда землетрясения оценивается по размеру атмосферной аномалии в соответствии с формулой Добровольского (2);

— положение эпицентра землетрясения оценивается по положению геометрического центра атмосферной аномалии.

Выводы

В статье представлены результаты оценки возможностей краткосрочного автоматизированного прогнозирования времени, положения и магнитуды сильных землетрясений по их краткосрочным предвестникам. В качестве наиболее достоверных предвестников сильных землетрясений (магнитуда более 6) предложены ионосферные и атмосферные аномалии, регистрируемые за несколько суток до сейсмических событий над зонами подготовки землетрясений.

Возможности прогнозирования основных параметров землетрясений (в перспективе с использованием методов машинного обучения) обусловлены разработанными, в том числе и при участии авторов:

— физической моделью генерации предвестников на основе теории литосферно-атмосферно-ионосферных взаимодействий;

— апробированными алгоритмами обработки информации об электронном содержании в ионосфере над зоной готовящегося землетрясения, получаемой с использованием глобальных навигационных спутниковых систем;

— отработанными алгоритмами обработки информации об атмосферном химическом потенциале, выражаемом через температуру и относительную влажность атмосферы над зоной готовящегося землетрясения, получаемой от спутниковых и наземных систем наблюдения;

— отдельными методами машинного обучения распознавания ионосферных предвестников землетрясений на основе сверточных нейронных сетей.

Список литературы

1. 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, стимулируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, вып. 4. С. 521–538.
2. Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 1(46). С. 167–172.
3. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Дудкин А.Ф., Цадиковский Е.И. 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. Перминов А.Н., Калинин С.Ю., Пулинец С.А., Разумова Н.В., Костенко В.В., Линьков А.Д. Система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Формирование структуры и перспективы создания // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7, С. 41–51.
5. Алексеев О.А., Пулинец С.А., Будников П.А., Серебряков В.Б., Разумова Н.В., Линьков А.Д. Макет информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений в Камчатско-Сахалинском регионе // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8(4). С. 3–15.
6. Pulinets S., Ouzounov D., Davidenko D., Budnikov P. Principles of organizing earthquake forecasting based on multiparameter sensor-WEB monitoring data / E3S Web Conf. 2020. V. 196. P. 03004.
7. Pulinets S., Shen X., Davidenko D. Research and development project for creation of services of the Multipurpose Aerospace Forecast and Monitoring System (MAFMS) of natural and man-made emergencies in Russia and the CIS countries (earthquakes forecast segment) / The 4th Intern. Workshop of CSES Mission, 17–21 October, 2019, Changsha, Hunan, China.
8. Bogdanov V., Gavrilov V., Pulinets S., Ouzounov D. Responses to the preparation of strong Kamchatka earthquakes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere system, based on new data from integrated ground and ionospheric monitoring / E3S Web Conf. 2020. V. 196. P. 03005.

9. Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Будников П.А. Метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэронаука. 2021. Т. 61. №1. С. 103–114.
10. Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atm. Solar Terr. Phys. 2003. V. 65. P. 1337–1347.
11. Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere. New Concepts. Springer Nature. 2022. 312 p.; <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-024-2172-9>
12. 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 аэронаука. 2018. Т. 58, №4. С. 579–591.
13. Parrot M. Statistical analysis of the ion and electron densities in relation with the seismic activity, Joint SEMEP. PreEarthquake Meeting, Brussels. 2012. Jan. 24th.
14. Pulinets S., Ouzounov D. The possibility of earthquake forecasting. Learning from Nature. IOP Publishing, Bristol, Dec. 2018. 167 p.; <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1248-6>
15. Pulinets S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit // Advances in Space Research. 2014. V. 53. P. 709–723; <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
16. Pulinets S., Budnikov P., Karelin A., Žalohar J. Thermodynamic instability of the atmospheric boundary layer stimulated by tectonic and seismic activity // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2023. 106050; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106050>
17. Pulinets S., Budnikov P. Atmosphere Critical Processes Sensing with ACP // Atmosphere. 2022. V. 513. P. 1920; <https://doi.org/10.3390/atmos13111920>
18. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure and Applied Geophysics. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
19. Kim Y., Nakata N. Geophysical inversion versus machine learning in inverse problems // The Leading Edge. 2018. V. 37. P. 866–944.
20. 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. 2014. V. 2014. Article ID 839205. 11 p.
21. Das V., Pollack A., Wollner U., Mukerji T. Convolutional neural network for seismic impedance inversion // Geophysics. 2019. V. 84, No 6.
22. Sun J., Slang S., Elboth T., Larsen Greiner T., McDonald S., Gelius L.-J. A convolutional neural network approach to deblending seismic data // Geophysics. 2020. V. 85, No 4.
23. Arikan O., Arikan F. Machine learning-based detection of earthquake precursors using ionospheric data / 42nd COSPAR Sci. Assembly, 14–22 July 2018, Pasadena, California, USA. Abstract id. C1.4-16-18 18.
24. Pulinets S.A., Gaivoronska T.B., Contreras A.L., Ciraolo L. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2004. V. 4. P. 697–702.
25. Pulinets S.A., Kotsarenko A.N., Ciraolo L., Pulinets I.A. Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation // Adv. Space Res. 2007. V. 39, No 5. P. 970–977.
26. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Y.V., Zhirovietiev I.V. Global electron content: A new conception to track solar activity // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 335–344.
27. Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Ганюнова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэронаука. 2010. Т. 50, №2. С. 240–252.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.09.2023
Дата принятия рукописи
в печать 31.01.2024