

В.О. Скрипачев¹
 И.В. Суровцева²
 О.А. Алексеев³
 Ю.А. Полушковский⁴
 А.О. Жуков⁵

V.O. Skripachev
 I.V. Surovtseva
 O.A. Alekseev
 Yu.A. Polushkovsky
 A.O. Zhukov

**СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ СИЛЬНЫХ
 ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ
 ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ
 СВЕРХДЛИННОВОЛНОВЫХ
 РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ**

**METHOD FOR DIAGNOSTIC OF STRONG
 EARTHQUAKES BY EVALUATING
 SIGNAL CHARACTERISTICS OF VLF
 RADIOTRANSMITTERS**

Предложен способ диагностики сейсмической активности Земли. Способ основан на использовании наземной территориально распределенной сети сверхдлинноволновых (СДВ) приемников для диагностики ионосферных предвестников землетрясений.

The method for diagnostics of Earth's seismic activity is presented. This method is based on the use of terrestrial distributed network of VLF receivers for diagnostics of ionospheric precursors of earthquakes.

Ключевые слова: сейсмическая активность, землетрясение, ионосфера, передатчик, приемник.

Keywords: seismic activity, earthquake, ionosphere, transmitter, receiver.

Актуальность мониторинга чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации обусловлена увеличением частоты возникновения опасных природных явлений и их влиянием на сложные технические системы [1; 2]. Среди опасных природных явлений наиболее значительную угрозу представляет сейсмическая опасность. Более 25% территории РФ с населением свыше 20 млн человек можно отнести к сейсмоопасным регионам с угрозой землетрясений силой 7 и более баллов.

После реализации утвержденной Правительством РФ Федеральной целевой программы (ФЦП) «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2011 года» в 2011 году сформирована новая аналогичная ФЦП до 2015 года (Распоряжение от 29.03.2011 г. № 534-р), в которой особо выделена необходимость совершенствования существующей Федеральной системы сейсмологических наблюдений (ФССН), созданной в целях координации деятельности органов государственного управления РФ по обеспечению защиты населения, объектов и территорий от воздействия землетрясений. В основу функционирования ФССН, являющейся подсистемой Российской системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях, положены деятельность служб министерств и ведомств, Российской академии наук и ведомственных институтов, а также их взаимодействие на основе комплексного анализа сейсмологических и геофизических данных служб наблюдения в целях прогнозирования времени,

¹ Начальник отдела НТЦ «Космонит» АО «Российские космические системы».

² Ведущий инженер НТЦ «Космонит» АО «Российские космические системы».

³ Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник АО «Российские космические системы».

⁴ Кандидат технических наук, заместитель директора НТЦ «Космонит» АО «Российские космические системы».

⁵ Доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН, старший научный сотрудник ГАИШ МГУ, профессор ФГБНУ «Аналитический центр».

силы и места предстоящих землетрясений, в том числе и приводящих к возникновению цунами [3].

Накопленный к настоящему времени значительный эмпирический и теоретический материал по исследованию наземными и космическими средствами физических процессов, сопровождающих подготовку землетрясений на разных стадиях, позволяет осуществлять прогнозирование сильных (с магнитудой ≥ 6) землетрясений [4; 5].

Из известного множества геофизических явлений как предвестников землетрясений рассматриваются аномальные вариации состояния локальных областей ионосферы, обусловленные ионосферно-литосферным взаимодействием, характеризующимся нестационарностью процессов даже на сравнительно коротких интервалах времени, наличием суточных и сезонных вариаций, а также присутствием различных помех естественного и техногенного характера [4; 6; 7].

Диагностика сейсмической активности по регистрации ионосферных аномалий с применением как наземных, так и космических средств связана с несколькими факторами [8], среди которых можно выделить основные:

- невоспроизводимость полевого эксперимента, а именно: отсутствие наблюдения одной и той же сетью станций, равно как и космическим аппаратом при повторяющихся параметрах землетрясений – гипоцентре, магнитуде и механизме очага;

- недостаточная плотность и неравномерность территориального распределения станций сети регистрации предвестников;

- нелинейные тренды и разброс параметров шумов, поступающих от космических, метеорологических и антропогенных источников;

- существование триггерных эффектов, которые способствуют возникновению землетрясений вследствие вариаций тектонических напряжений из-за земных приливов, изменения атмосферного давления, скорости вращения Земли и др.

Ионосферные предвестники землетрясений достаточно различны по своей природе, однако для их наблюдений требуется широкий спектр аппаратуры как наземного, так и космического базирования [9], поэтому создание целенаправленной системы мониторинга сейсмической активности является достаточно затратным, и, как правило, эта функция возлагается на существующие наземные и космические системы.

Одним из малозатратных способов диагностики сейсмической активности является способ, основанный на анализе характеристик сигналов существующих радиопередатчиков

сверхдлинноволнового (СДВ) частотного диапазона (10...50 кГц) [10]. Фрагмент (европейская территория) карты расположения СДВ-передатчиков показан на рис. 1.



Рис. 1. Расположение европейских СДВ-радиопередатчиков (MSCW1 – радиоприемник в Москве)

На рис. 2 приведена сеть СДВ-радиоприемников, входящих в систему сбора и обработки данных центра солнечных исследований Стэнфордского университета.



Рис. 2. Расположение СДВ-радиоприемников, входящих в систему сбора и обработки данных центра солнечных исследований Стэнфордского университета

Способ основан на том, что радиоволны СДВ частотного диапазона характеризуются особенностью распространения в волноводе «ионосфера – земная поверхность». Наличие локальных ионосферных возмущений приводит не только к изменению протяженности пути распространения СДВ-радиоволн, но и к модуляции их амплитуды и фазы [10]. Регистрация аномального повышения амплитуды принимаемого сигнала по одной трассе распространения радиоволны не дает возможности пространственной локализации места ионосферного возмущения. Для

диагностики сейсмоионосферного возмущения целесообразно иметь территориально распределенную сеть приемников.

На рис. 3 приведено схематичное расположение СДВ-радиопередатчиков и СДВ-приемников, обозначенных T_i и R_i соответственно. Как видно из рисунка, спокойными являются трассы распространения СДВ-радиосигналов $T_1R_1, T_1R_2, T_1R_3, T_1R_4, T_1R_5, T_2R_1, T_2R_2, T_2R_3, T_2R_4, T_2R_5, T_2R_6$, тогда как сигналы, распространяющиеся по трассам T_1R_6, T_2R_5, T_2R_6 , проходят через возмущенную область ионосферы. **Обнаружение ионосферного возмущения по трассе** осуществляется путем выявления в процессе обработки характерных вариаций параметров сигналов, а определение места ионосферного возмущения – по одновременно проявляемым характерным вариациям сигналов на двух взаимно пересекающихся трассах.

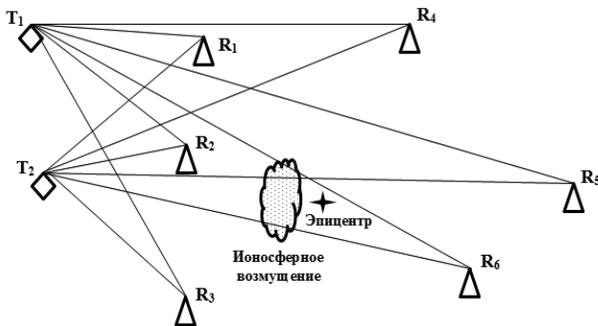


Рис. 3. Схематичное расположение СДВ-радиопередатчиков и СДВ-приемников для определения места ионосферного возмущения по одновременно проявляемым характерным вариациям сигналов на двух взаимно пересекающихся трассах

Следует отметить, что продолжительность существования локально возмущенной области ионосферы ограничена десятками минут, а также может не совпадать с эпицентром будущего землетрясения вследствие магнитосферно-ионосферных взаимодействий [4]. Поэтому реализация предлагаемого способа предполагает наличие постоянно действующей сети приемных средств и оперативного сбора и обработки данных.

При расчете размеров зон земной поверхности, затрагиваемых литосферным напряжением, равно как и для оценки зоны наблюдения ионосферных предвестников, используется математическое выражение, предложенное И.П. Добровольским [11] и проверенное С.А. Пулинцом и др. [4]:

$$p = 10^{0,43M},$$

где p – радиус зоны подготовки землетрясения;
 M – магнитуда предполагаемого события.

Как правило, суточный ход принимаемого СДВ-радиосигнала для каждой отдельно взятой частоты имеет суточные и сезонные вариации в спокойных ионосферных условиях, что позволит селективировать аномальные вариации сигнала. Однако ход принимаемого СДВ-радиосигнала может существенно варьироваться вследствие солнечных вспышек, а также метеорологических процессов (грозовые разряды) в атмосфере, вносящих шумы в полезный сигнал [12]. В целях обнаружения аномальных ионосферных возмущений названные выше процессы обуславливают необходимость применения методов статистики при обработке получаемых сигналов.

В Научно-технологическом центре «Космосит» АО «Российские космические системы» изготовлен и прошел экспериментальную проверку аппаратно-программный комплекс (АПК) [10], реализующий описываемый способ. АПК структурно состоит из активной антенны, СДВ-радиоприемника и ПЭВМ с соответствующим специальным программным обеспечением (СПМО). Структурная схема АПК приведена на рис. 4. Внешний вид антенны и приемника показан на рис. 5.

СПМО решает задачу обработки принимаемых сигналов в частотном диапазоне от 0 до 50 кГц. Накапливаемая при обработке статистика позволяет выявить на суточном и более продолжительном временных интервалах вариации характеристик сигнала, принимаемых от каждого из работающих СДВ-радиопередатчиков в спокойной и в возмущенной ионосферной обстановке. СПМО обладает графическим интерфейсом пользователя, позволяющим выполнять анализ принятой информации с последующим принятием решений о наличии ионосферных возмущений на трассе распространения СДВ-радиосигналов [2].

Как было указано выше, СДВ-радиосигналы чувствительны к солнечным вспышкам. На рис. 6 показаны результаты обработки сигналов от СДВ-радиопередатчиков: *GQD* (22.1 кГц, Великобритания), *JJI* (22.2 кГц, Япония) и *NAA* (24.0 кГц, США), полученные 11 марта 2015 г. По оси абсцисс указано время *UTC*. Как видно из рисунка, около 16 *UTC* (отмечено стрелкой) наблюдалось повышение амплитуды принимаемого сигнала, связанное с возмущением ионосферы по трассам распространения радиоволн, обусловленное произошедшей солнечной вспышкой балла X2.1.

Предлагаемый способ диагностики сейсмической активности обладает преимуществами: невысокая стоимость, простота реализации и экс-



Рис. 4. Структурная схема АПК

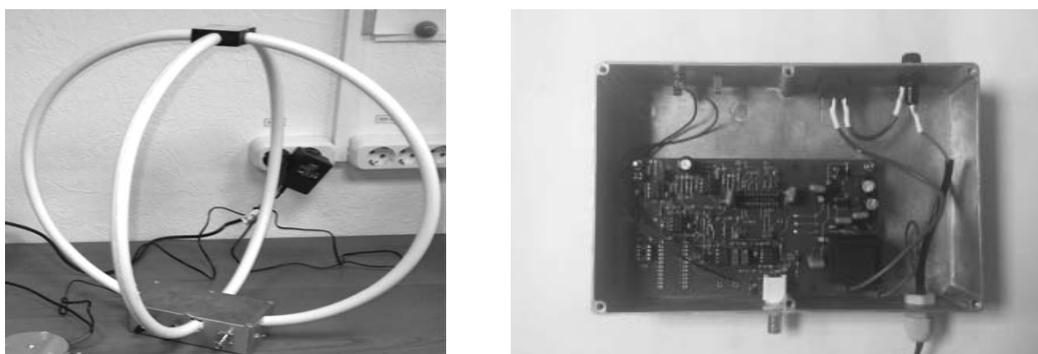


Рис. 5. Внешний вид антенны (слева) и приемника (справа) АПК

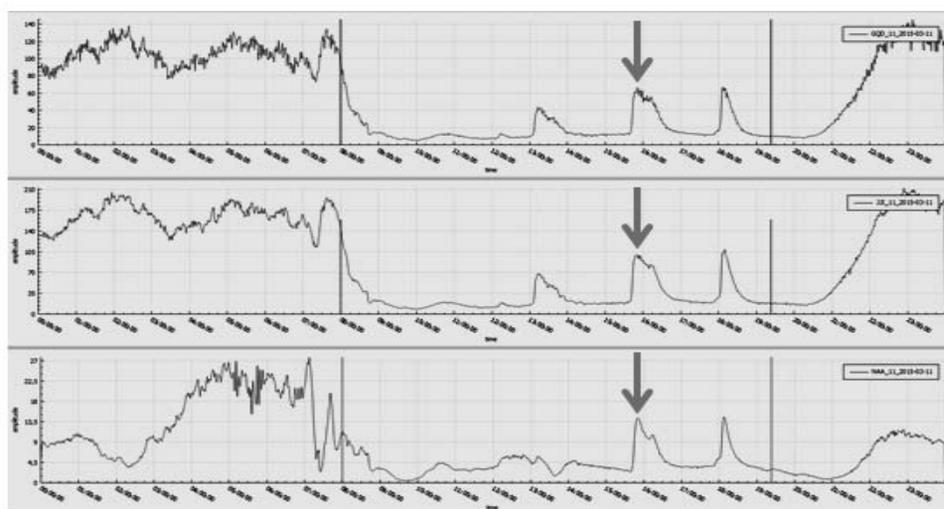


Рис. 6. Результаты обработки сигналов от трех СДВ-радиопередатчиков, принятых 11 марта 2015 г.

плуатации. Также способ позволяет наблюдать эффекты солнечных вспышек. Для реализации способа необходимо создание территориально распределенной сети на основе разработанного АПК с учетом географического расположения тектонических разломов на территории РФ, а также центра сбора и обработки информации на основе современных информационных технологий [13]. Вместе с тем предлагаемый способ не может рассматриваться как единственно возможный и обеспечивающий достаточную достоверность прогноза землетрясений. Реализация способа может быть использована в ФССН как отдельная подсистема.

Литература

1. Биккузина А.И., Жуков А.О., Желнов И.И. Система поддержки принятия решений при информационно-аналитическом обеспечении оценки и прогноза экологического состояния территорий эксплуатации ракетно-космической техники // *Науковедение*. – 2015. – Т. 7. – № 2. – С. 1–11
2. Биккузина А.И., Жуков А.О., Никольский Ю.В., Буханец Д.И. Подход к решению задачи упорядочения альтернатив в диалоговой системе моделирования принятия решения при информационно-аналитическом обеспечении оценки и прогноза экологического состояния территорий эксплуатации крупных технических комплексов // *Новые исследования в разработке техники и технологий*. – 2014. – № 1. – С. 33–40.
3. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (Информационно-аналитический бюллетень). – М. : МЧС РФ и РАН. – 1994. – № 1. – 56 с.; № 2. – 84 с.
4. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В. Прогноз землетрясений возможен?! Интегральные технологии многопараметрического мониторинга геоэффективных явлений в рамках комплексной модели взаимосвязей в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли. – М. : Тривант, 2014. – 144 с.
5. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация / А.Д. Завьялов; Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М. : Наука, 2006. – 254 с.
6. Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
7. Липеровский В.А. Ионосферные предвестники землетрясений. – М. : Наука, 1992. – С. 303.
8. Соболев Г.А. Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев; отв. ред. В.Н. Страхов. – М. : Наука, 2003. – 270 с.
9. Скрипачев В.О., Скребушевский Б.С., Чернявский Г.М. Бортовая аппаратура космических аппаратов мониторинга предвестников землетрясений // *Исследование Земли из космоса*. – 2004. – № 6. – С. 50–58.
10. Скрипачев В.О., Полушковский Ю.А., Назаренко А.С. Аппаратно-программный комплекс диагностики состояния ионосферы по данным ОНЧ радиосигналов // *Программные продукты и системы*. – 2014. – № 108. – С. 155–157.
11. Dobrovolsky, I.P., Zubkov S.I. and Miachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zone // *Pure Appl. Geophys.* – 1979. – № 117. – Pp. 1025–1044.
12. Скрипачев В.О., Полушковский Ю.А., Алексеев О.А. Аппаратно-программный комплекс оперативного обеспечения потребителей спутниковой метеорологической и геофизической информацией // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 332–335.
13. Бочаров Л.Ю., Буханец Д.И., Жуков А.О. Использование квантовых информационных технологий при разработке сложных технических систем // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2014. – № 11. – С. 4–9.
14. Гладышев А.И., Жуков А.О. Методика использования искусственных нейронных сетей с целью идентификации параметров движения летательных аппаратов // *Вестник Российского нового университета*. – 2014. – Выпуск 4. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 149–151.
15. Гладышев А.И. / Анализ системы управления сложными динамическими объектами (системами) // *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление»*. – 2015. – Выпуск 1. – С. 44–48.
16. Гладышев А.И. Вопросы создания единого информационного пространства в космотехносфере // *Вестник Российского нового университета*. – 2014. – Выпуск 4. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 137–140.