

УДК 550.34+550.38

Комплекс наземных сейсмопрогностических наблюдений, методов их обработки и анализа совместно с данными космических наблюдений

С. В. Мостовой, В. И. Старостенко, О. М. Харитонов

Институт геофизики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ

Надійшла до редакції 03.12.97

Розглянута методика комплексування наземних та космічних вимірювань геофізичних полів з метою прогнозу землетрусів. Значна увага приділена обробці та аналізу тих полів, в яких раніше мали місце прояви передвісників сейсмічних подій. Запропонована математична модель прогнозу землетрусу. Процес виявлення передвісників розглядається як задача детектування сигналу передвісника на тлі багатовимірного випадкового процесу, який являють собою вимірювання геофізичних полів в іоносфері Землі та на її поверхні.

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз землетрясений включает прогноз места, времени, интенсивности будущего очага сейсмической активности и носит вероятностный характер. Поэтому для повышения надежности прогноза практикуется комбинирование разных методов исследований, в частности космических и наземных наблюдений. Настоящая работа посвящена комплексу наземных сейсмопрогностических наблюдений, который может быть организован на территории Украины для оценки сейсмической опасности в ее пределах.

Процесс подготовки сильного землетрясения очень длителен и охватывает значительные области площадью в несколько тысяч кв. км. С течением времени накопление напряжений локализуется и процесс завершается быстрым освобождением энергии в ограниченном объеме, называемом очагом землетрясения. Определение параметров этого очага и времени его разрядки составляет основную задачу прогноза. Так как подготовка землетрясения сопровождается изменением свойств среды, геофизических полей и химического состава гидросферы, то перечисленные флюктуации могут служить

предвестниками будущего разрушительного события. Наиболее информативными признаками подготовки сильного землетрясения являются вариации отношения скоростей распространения продольных и поперечных волн (V_p/V_s), стягивание эпицентров слабых землетрясений к будущему очагу разрушения среды, изменение уровня подземных вод, вариации магнитного поля и электропроводности Земли, водонасыщение пород и содержание радона в подземных водах, скорости крипа и изменения температурного режима. Ни один из перечисленных признаков не является достаточно надежным предвестником приближающегося интенсивного землетрясения. Только комплексный подход может дать обоснованный ответ на вопрос о месте, времени и интенсивности землетрясения.

Анализ современного состояния геофизической науки позволяет сделать вывод об изменении тенденций в ее развитии. Наряду с традиционно глубоким анализом геофизических полей и связанных с этими полями процессов в коре и мантии Земли, с совершенствованием математических моделей этих процессов, совершенствованием измерительной аппаратуры и (может быть самое важное) наблюдательной сети, которая теперь включает в

себя еще и спутниковые наблюдения за динамикой состояния ионосферы, и возможностями вычислительных средств осуществлять сложную обработку огромных массивов данных наблюдательной сети в реальном времени, появилась возможность мониторинга геофизических полей и связанная с этим возможность изучения динамики коротко живущих и слабо выраженных процессов, таких как подготовка сейсмических событий.

Под геофизическим мониторингом будем понимать режимные наблюдения за геофизическими полями и их анализ для изучения динамики Земли и ее фрагментов и прогноза их развития. Нужно отметить, что режимные наблюдения для геофизики не новость, а суть ее существования, но мониторингом такие наблюдения становятся лишь при возможности анализа данных в реальном или близком к нему времени. Огромные массивы обрабатываемой информации требуют автоматизированного анализа, оценок интерпретируемых параметров, конструирования выводов и принятия решения. Последнее должно осуществляться в интерактивном режиме информационного обмена между исследователем и системой. Перечисленные обстоятельства требуют создания математических моделей процессов формирования полей для работы в системах мониторинга, т. е. оперирующих небольшим числом параметров для возможности быстрой их оценки и экспресс анализа в автоматизированной системе. Сложность модели, или количество описывающих ее параметров, определяется возможностями системы обработки и целями экспресс-анализа в автоматизированном режиме.

СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ЗОНЫ УКРАИНЫ

Сейсмоактивные зоны Украины сосредоточены в двух регионах, Крымском и Карпатском. В Крымском регионе можно выделить две сейсмоактивные зоны: Южнобережную с максимальной интенсивностью землетрясений 7—8 баллов в районе г. Ялты и Южноазовскую в районе одноименного разлома вблизи Керченского полуострова с интенсивностью воздействий того же порядка. В Карпатском регионе можно выделить три сейсмоактивные зоны: Закарпатье с максимальной интенсивностью колебаний вблизи эпицентров 7—8 баллов, Предкарпатье и Буковину с интенсивностью 5—6 баллов и расположенную в Румынии область сочленения Восточных и Южных Карпат — Вранча. Последняя зона оказывает существенное влияние на сейсмический режим территории Украины. При максимально возможных по энергетическому классу событий зоны

Вранча, магнитуда которых равна 7.5, интенсивность сотрясений на юго-западе Одесской области может достигать 8 баллов. Для изучения геодинамических процессов в указанных районах созданы Крымский и Карпатский геодинамические полигоны. На Крымском геодинамическом полигоне расположены 6 стационарных сейсмических станций и 5 пунктов комплексных геофизических наблюдений. В Карпатском регионе — 11 стационарных сейсмических станций и 10 пунктов комплексных наблюдений. Это позволяет проводить изучение следующих предвестников землетрясений.

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системы стационарных станций в Крымском и Карпатском регионах позволяют достаточно надежно регистрировать времена прихода волн не только от сильных, но и от слабых землетрясений, выявлять основные закономерности размещения очагов в сейсмогенных зонах, изучать закономерности подготовки сильных землетрясений и увязывать их с геофизическими и геохимическими процессами в окружающей среде. При подготовке сильного землетрясения происходит стягивание мелких трещин к направлению сейсмогенерирующего разлома, что достаточно надежно контролируется по сейсмологическим данным.

Этот процесс охватывает несколько десятилетий и относится к числу долгосрочных прогнозных признаков. За несколько лет до сильного землетрясения наблюдается продолжительный период сейсмологического затишья, характеризующегося накоплением энергии деформации горных пород и завершающегося кратковременным освобождением ее в ограниченном объеме. Процесс стягивания слабых толчков к будущему сильному сопровождается изменением свойств среды и соответствующими вариациями свойств геофизических полей.

Прогностические свойства сейсмических полей исследуются на геодинамических полигонах Украины. При изучении изменения сейсмического процесса в преддверии сильного землетрясения в Крымском регионе исследовано пространственно-временное распределение слабых толчков энергетического класса $K = 8—9.5$, предшествующих более сильным землетрясениям $K > 11$. Для этого использовано поле слабых толчков. Были предсказаны 5 сильных сейсмических событий, эпицентры которых относятся к центральной части Крымско-Черноморского региона. Исследование распределения во времени слабых толчков при подготовке сильного и изменение расстояния между ними и эпицент-

ром главного события оценено как перспективное направление прогностических признаков.

Для анализа процесса подготовки сильных землетрясений в Крыму изучались и опробованы в других регионах параметры, такие как угловой коэффициент наклона графика повторяемости землетрясений γ , число землетрясений n , соотношение скоростей распространения V_p/V_s и амплитуд колебаний A_p/A_s продольных и поперечных объемных волн [2, 3, 6, 11, 15–18].

По результатам изучения пространственно-временных изменений полей, а также по изучению энергетических характеристик сейсмического процесса, предшествовавшего карпатскому глубоководному катастрофическому землетрясению 04.03.1977 г., $M = 7.2$ ($K = 17$), выявлено существование определенных закономерностей в преддверии крупного землетрясения в зоне Вранча [13]. Основные из них: 1) резкое сужение эпицентрального поля слабых событий ($K = 11–13$) в пятилетний период, предшествующий сильному землетрясению, в узкую полосу, совпавшую с поверхностью будущего магистрального разрыва; 2) концентрация сейсмической активности в области будущего очага за несколько лет до главного события; 3) прекращение процесса за пределами этой области; 4) уменьшение углового коэффициента с $\gamma = 0.48$, характерного для спокойного режима, до $\gamma = 0.30$, что свидетельствует о резком ускорении процесса образования крупных трещин в области подготовки макротрещины.

Согласно выявленным перечисленным признакам подготовки землетрясения 04.03.1977 г. был дан пробный прогноз места сильного очередного события, происшедшего 30.08.1986 г. в районе Вранча. Магнитуда этого землетрясения соответствовала 6.9 ($K = 16.4$). В отношении предсказания точного времени возникновения сильного сейсмического события дело обстоит сложнее. Как отмечено в работе [13], отсутствуют критерии, четко указывающие на завершение процесса стягивания эпицентров, т. е. процесса развития очага. Это создает серьезные трудности для прогноза времени возникновения очередного разрушительного события. Следовательно, к изменению сейсмического поля (по расположению эпицентров слабых толчков) можно относиться как к долгосрочному предвестнику. Информация о среднесрочных и краткосрочных предвестниках в определенной мере может быть получена при рассмотрении их временных вариаций.

По наклономерным наблюдениям, проведенным в Кишиневе, обнаружено появление аномального короткопериодного наклона флюктуирующего типа за несколько суток перед карпатским землетрясением

30.08.1986 г. Аналогичные эффекты наблюдались и перед более слабыми землетрясениями в Карпатском регионе.

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

К длиннопериодным флюктуациям геомагнитного поля относятся вариации с периодом, превышающим сутки. Они изучаются на основании круглосуточных наблюдений полного вектора напряженности геомагнитного поля T с помощью современных протонных магнитометров МВ-01 с чувствительностью 0.1 нТл. Используется специальная дифференциальная методика, с помощью которой определяются среднесуточные значения разностного поля между парами режимных станций. Такая методика позволяет изучать только ту часть вариаций, которая обусловлена тектоническими процессами в литосфере [8, 25].

На основании предложенной методики наблюдений изучаются изменения во времени геомагнитного поля, выделяются аномальные периоды, которые сопоставляются с сейсмическим режимом. В последние годы в Карпатском регионе получен ряд временных аномалий, которые связаны с локальными землетрясениями. К их числу относятся Чопское землетрясение 02.07.1982 г., эпицентр которого был расположен на расстоянии 10 км от границы Украины и Венгрии. Наиболее интенсивные толчки силой до 6 баллов отмечались в трех деревнях Береговского района. Отрицательная аномалия T начала формироваться в начале мая и достигла минимума в конце этого месяца, а нормальное значение T было достигнуто в середине июля.

На стадии возобновления поля и произошло землетрясение в районе Чопа. Аналогичный эффект наблюдался перед землетрясениями в районе Виноградovo, серия которых произошла 06.05.1989 г., при этом отрицательная аномалия по T начала формироваться в начале года, а минимум сформировался в середине марта. За период с 1982 по 1995 гг. на территории Закарпатья отмечены аномалии T , из них 15 сопровождалась землетрясениями. Характерная форма аномалий T в виде бухтоподобного возбуждения с дальнейшим восстановлением начального уровня типична для долгопериодных аномалий геомагнитного поля — предвестников землетрясений наблюдалась в других сейсмоактивных регионах [1], в частности в Крымском за 72 дня до землетрясения 1989 г. в Армении.

Приведенные примеры свидетельствуют, что долгопериодные флюктуации геомагнитного поля яв-

ляются достаточно надежными предвестниками сильных землетрясений, относятся к очень важному классу среднесрочных с упреждением 1.5—3 месяца и существенно дополняют долгосрочные прогнозы по сейсмологическим данным, так как информативны в период сейсмического затишья. Дальнейшее развитие этого направления связано с изучением изменений во времени не только модуля T , но и компонентов геомагнитного поля, что позволило бы производить увязку наземных и космических наблюдений и выяснить природу аномальных явлений. Для этого необходима дополнительная аппаратура для дооборудования существующих станций режимных наблюдений.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ

Следующий диапазон частот электромагнитного поля Земли, информативный с точки зрения подготовки землетрясений, охватывает область от десятков Гц до сотен кГц и связан с аномалиями электромагнитного излучения (АЭМИ). Информационными характеристиками в этом случае служат вариации уровня огибающей ЭМИ с амплитудой, превышающей уровень дискриминации. Эти характеристики используются для изучения корреляции во времени между сейсмическими событиями и аномалиями ЭМИ (Япония, США, Средняя Азия, Карпаты, Кавказ). Аномалии ЭМИ опережают сейсмическое событие на несколько секунд или практически совпадают с ним, как это наблюдалось во время землетрясения в районе Вранча 01.03.1977 г. или в Судаке 16.08.1990 г. Аномалии ЭМИ являются краткосрочными предвестниками и могут служить для уточнения времени и места очага землетрясения в комплексе с сейсмологическими данными. В связи с высоким фоном электрических полей техногенного и естественного происхождения, существенным влиянием метеоусловий помехоустойчивость и надежность этого метода прогнозирования землетрясений очень низкая.

АНОМАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Короткопериодные пульсации геомагнитного поля являются наиболее тонким индикатором физического состояния магнитосферы. Данные о генерации геомагнитных пульсаций в связи с землетрясениями содержатся во многих работах, но они довольно противоречивы как относительно морфологических признаков, так и относительно механиз-

мов их генерации. Установлены связи землетрясений с такими явлениями, как аномальное увеличение интенсивности ЭМИ в ионосфере [12], изменение параметров ионосферного слоя F2 [5], увеличение среднего уровня интенсивности вариаций компонентов геомагнитного поля и другое. Эти изменения параметров разных областей магнитосферы в связи с землетрясениями показывают, что указанные выше проявления пульсаций не являются случайными.

В Карпатском отделении Института геофизики НАН Украины использованы продолжительные непрерывные наблюдения короткопериодных пульсаций типа Pc на региональной электромагнитной станции Корец за период 1969—1980 гг. Были проанализированы особенности морфологии пульсаций типа Pc. Отмечено, что кроме типовых пульсаций, которые имеют характерный суточный ход, появляются специфические пульсации PcS, которые не связаны с определенным периодом суток и возникают перед сильными землетрясениями. Было выделено около 250 пульсаций PcS и выполнен статистический анализ их связи с землетрясениями. При этом определялся интервал времени t между появлением пульсации и моментом последующего землетрясения с $M > 4$. Установлена линейная зависимость t от периода пульсаций T . Установлены корреляционные зависимости между периодом пульсаций T и глубиной очага землетрясений n . Выполненный анализ свидетельствует о связи процессов подготовки землетрясений со специфическими явлениями в магнитосфере Земли и нуждается в продолжении исследований в этом направлении с использованием новейшей аппаратуры с цифровой регистрацией.

ВРЕМЕННЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Исследования последних лет показали, что передаточные функции геомагнитного поля (векторы Визе и индукции) испытывают аномальные изменения во времени в сейсмоактивных регионах [19]. В последних работах китайских геофизиков приведены примеры успешного применения передаточных функций для прогноза сильных землетрясений с $M > 5$ при удалениях от эпицентра 60—410 км. Исследования такого плана проводятся в Карпатском регионе по данным трехкомпонентной магнитовариационной станции, которая установлена в 1989 г. в специальном павильоне на региональной станции «Нижнее селище». Эти данные используются для систематического определения передаточ-

ных функций и анализа их временных изменений. В результате были установлены значительные временные изменения векторов Визе и векторов индукции [21]. Связи этих аномальных изменений с конкретными сейсмическими событиями не наблюдается, но они совпадают с периодами региональной сейсмической активизации в районе Вранча и в Карпато-Динарской зоне в июне и декабре 1990 г. Возможным источником аномальных изменений можно принять локальную электропроводящую структуру, которая служит индикатором вариаций геодинамического режима в регионе. Работы в этом направлении продолжаются.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ

Гидрогеохимические параметры, изучаемые на Карпатском полигоне в Закарпатье на нескольких опорных пунктах (Берегово, Свалява, Лисарня) не прореагировали на землетрясение 30.08.1986 г. В то же время были выявлены циклические колебания геохимических параметров, связанные с лунно-солнечными приливами. По данным наблюдений на семи водопунктах установлено наличие тесной корреляционной связи между атмосферным давлением и уровнем подземных вод в период сейсмического затишья и нарушение ее на расстояниях до 100 км от очагов местных землетрясений ($K = 6-11$) во время активизации сейсмических процессов в Закарпатье [18].

Это подтверждает известное представление о том, что Восточные Карпаты являются природным барьером, поглощающим значительную часть сейсмической энергии, распространяющейся в северо-западном направлении от Вранча, в том числе и в Закарпатье. По поведению геохимических параметров видно, что экранируется не только сейсмическая энергия, но и изменение напряженного состояния «сейсмического тела» также не отражается в природных полях. В это же время на Крымском геодинамическом полигоне за 30 суток до землетрясения 30.08.1986 г. обнаружены изменения уровня подземных вод и их химического состава. Установлены изменения геомагнитного поля и электросопротивления за 3—4 суток до землетрясения [6]. Следовательно, система широтных разломов, направленная на восток от зоны Вранча, в частности вдоль шельфа Черного моря, проводит изменения напряжения, происшедшие в зоне Вранча перед сильным землетрясением. Это подтверждается и аномальным выделением газа (с содержанием радона) на одном из источников, расположенном на склоне Крымских гор. Вариации, связанные с под-

готовкой далеких землетрясений, в том числе и Спитакского, зафиксированы на Крымском геофизическом полигоне [4].

По результатам пятнадцатилетних наблюдений за гидрогеологическими и геохимическими параметрами в Крыму (уровнем подземных вод, температурой воды, содержанием ионов хлора, гелия и других в воде) при подготовке слабых местных землетрясений выявлены определенные закономерности, которые могут рассматриваться как прогнозные [4, 18]. Изменения параметров флюидов отмечены лишь на пунктах, расположенных в зонах, близлежащих к будущим очагам землетрясений (Алуштинское, 1984 г.; Азовское, 1987 г.; Судакское, 1990 г.). Наиболее информативными оказались газовые компоненты флюидной системы, особенно гелий. Перед Алуштинским землетрясением 05.07.1984 за 3—5 суток до возникновения первых толчков отмечено снижение концентрации гелия, затем началось ее увеличение с максимумом за три дня до главного толчка. Гидрогеохимические предвестники следует отнести к классу краткосрочных.

ОТРАЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ИОНОСФЕРЕ И МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Изменения механической напряженности в коре и мантии вызывают изменение напряженности электрического и магнитного полей как на поверхности Земли, так и в ионосфере. Свидетельством этому служит обширная библиография работ, в которых апостериори анализируется связь сейсмических событий с ионосферными возмущениями.

Связь сейсмической активности с возмущениями в ионосфере, основанная на инструментальных наблюдениях, замечена сравнительно недавно. J. W. Warwick [30] связал землетрясения в Чили с аномалиями поглощения космического радиоизлучения в ионосфере, которые наблюдались за шесть дней до события. В работе [23] отмечена корреляция между Аляскинским землетрясением 28.03.1964 г. и возмущениями в распространении радиосигналов в ионосфере в диапазоне частот 4, 5 и 10 МГц.

В работе [24] приводятся результаты радиозондирования волноводов Земля—нижняя ионосфера сверхдлинными волнами. Представлены результаты по локализации мест с аномальными характеристиками в нижней ионосфере, которые авторы связывают с сейсмо-ионосферным взаимодействием. Были отмечены изменения амплитуды и фазы сигналов в волноводе в диапазоне частот 10—15 кГц. Эти изменения отмечались в ночное время в 360 км

от района землетрясения в период от пяти дней до и трех дней после Гиндукушского землетрясения 30.12.1983 г. с магнитудой 6.7 на глубине 208 км. Такая же ситуация сложилась и во время второго случая Гиндукушского землетрясения 15.11.1985 г. с магнитудой 4.6 на глубине 3 км и на удалении 200 км от эпицентра.

Попытка статистически связать низкочастотную (~1—10 кГц) эмиссию радиоволн в верхней ионосфере над зоной землетрясений с землетрясениями, была сделана в работе [26]. Здесь отмечалось аномальное возрастание низкочастотной эмиссии радиоволн в диапазоне частот от 0.1 до 16 кГц над эпицентром землетрясения. Измерения осуществлялись со спутника «Интеркосмос-19» в верхней ионосфере. Достоверность обнаружения указанного явления авторы оценивают как 0.8—0.9.

Пульсации вертикальной составляющей электрического и магнитного полей на частоте, близкой к 1 Гц, наблюдались над эпицентром землетрясения 21.01.1982 г. по данным наблюдений со спутника «Интеркосмос—Болгария-1300» [22].

В работе [7] отмечено, что в процессе спутниковых измерений в 1981—1986 гг. в ионосфере и магнитосфере Земли были возмущения, обусловленные сейсмической активностью, и приведены основные типы ионосферных возмущений, которые по мнению авторов можно связать с последующими землетрясениями.

К сожалению, в работах по ионосферным предвестникам нет анализа возможных источников возмущений в ионосфере, не связанных с процессами подготовки землетрясений, на фоне событий, происходящих в литосфере. Поэтому затруднительно сделать заключение о вероятности ложных тревог и пропуска сейсмического события. По-видимому, подготовка сильного землетрясения почти всегда вызывает ионосферные возмущения, в то время как подобные возмущения могут возникать еще и из-за целого ряда причин, не связанных с процессами, развивающимися в литосфере, в том числе и техногенного характера. Поэтому вероятность ложной тревоги может быть очень большой. По этой причине анализ состояния ионосферы с целью прогноза землетрясений вне системы, включающей наземные наблюдения, не представляется сколько-нибудь обещающим.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В Институте геофизики проведены работы по созданию математической модели прогноза сейсмического события, которая реализована в автоматизи-

рованной системе мониторинга объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС для целей анализа динамики состояния строительных конструкций [10].

Ретроспективный анализ происшедших землетрясений и сопутствовавших им предвестников позволяет сделать вывод о том, что в каждом конкретном случае выделить один достаточно информативный фактор в качестве предвестника не удается. Это связано, прежде всего, с наличием достаточно мощных нестационарных помех и, возможно, с тем обстоятельством, что по изменению во времени одного параметра нельзя построить процедуру принятия решения о времени и интенсивности будущего землетрясения, которая бы позволяла строить прогноз с большой вероятностью.

По-видимому, только совместный анализ совокупности достаточно большого числа малоинформативных геофизических параметров с учетом статистических свойств стационарных и нестационарных помех может оказаться перспективным для построения процедур формального принятия решения о прогнозе.

Такой подход приводит, во-первых, к необходимости исследования не связанных с предвестниками нестационарных и стационарных помех, сопутствующих измерению каждого из прогностических параметров, и в реальном масштабе времени оптимально осуществлять процедуру фильтрации всех прогностических параметров с учетом статистических свойств помех и компенсацию нестационарных помех. Для этого на этапе обучения модели фильтрации нестационарных помех необходима параллельная их регистрация и построение оптимальных оценок параметров модели связи помехи и прогностического параметра, чтобы построить оптимальные оценки параметров фильтра. Например, естественно предположить, что уровень воды в скважинах, который используется как один из прогностических параметров, связан с атмосферным давлением и количеством выпадающих осадков. Причем характер этой связи априори неизвестен, но в качестве первого приближения может приниматься линейным с чисто транспортной задержкой.

Во-вторых, на этапе обучения для совокупности прогностических параметров, отфильтрованных от нестационарных помех, например по критерию минимума дисперсий на выходе фильтра, необходимо исследовать форму и интенсивность потока сигналов в связи с происходящими событиями.

Множество параметров, таких как поток микросейсмических событий, электропроводности горных пород, поведение уровня воды в скважинах, возмущений состояния ионосферы, изменение интенсивности эманаций радона и т. д. можно рас-

смаивать в виде векторного случайного процесса, на фоне которого необходимо выделить некоторый векторный сигнал-предвестник, параметры которого априори неизвестны, а статистические характеристики определяются на этапе обучения. Для этого необходимо отобразить пространство случайных функций-предвестников на случайное векторное пространство, что существенно облегчит набор статистик и последующий анализ прогностических параметров.

В-третьих, необходимо построить в реальном масштабе времени процедуры формального принятия решения о прогнозе, основанные на предыстории зарегистрированного векторного случайного процесса и результатах, полученных на этапе обучения, когда устанавливается статистическая связь между параметрами сигнала-предвестника и параметрами сейсмического события. Процедуры принятия решения должны включать эвристики исследователя в виде степени доверия значениям компонентов случайного процесса и стратегий линий поведения в зависимости от принятого решения.

В четвертых, такая процедура может включать оптимальное по выработанному критерию оценивание вектора параметров сигнала-предвестника с введенными в качестве эвристик исследователя априорными распределениями оцениваемых параметров и принятие решения о прогнозе с учетом формально введенной функции стоимости потерь от неверно принятого решения, а именно пропуска цели и ложной тревоги.

Пятым важным моментом является то обстоятельство, что нужно анализировать огромные объемы самой разной информации в реальном масштабе времени. Это порождает две проблемы. Первая — выделение фрагментов непрерывно поступающей информации, которые в дальнейшем рассматриваются как сигнал (задача неидентифицированного обнаружения). Вторая — измерение параметров сигнала, его идентификация как связанного с событием и накопление таких сигналов в базе данных (задача оптимальной оценки параметров потока сигналов, идентификации).

Шестым, и последним пунктом, нужно отметить собственно построение оператора прогноза, отображающего предысторию потока сигнала в вектор параметров будущего сейсмического события. Поскольку представляющие интерес для прогноза землетрясения события редкие, то естественно пойти по пути анализа предвестников и синтеза оператора прогноза на слабых сейсмических событиях с последующей экстраполяцией в область сильных землетрясений (задачи регрессии, статистической экстраполяции).

Перечисленные шесть пунктов, объединенных в единую систему, будем называть математической моделью прогноза сейсмического события.

Ниже рассмотрим проблему, связанную с первым из перечисленных пунктов в математической модели прогноза, а именно определению, если таковой существует, оператора связи между отдельными компонентами векторного процесса измерений прогностических признаков с целью выбора лишь ортогональных в выбранном смысле компонентов. Вопросы, связанные с отдельными пунктами математической модели прогноза рассмотрены в [27—29].

В этом параграфе рассматривается подход к решению первой из перечисленных в математической модели задач, а именно оценке информативности для выбранных целей различных компонентов многомерного процесса измерений геофизических полей. Предлагается следующая модель процесса: выбранные для интерпретации результаты измерений $y_i(t)$ как функции времени образуют векторный случайный процесс $y(t) = \{y_i(t)\}; i = 1, \dots, n; t \in \Gamma$, где Γ — доступная исследователю предыстория процесса, n — количество выбранных для интерпретации параметров.

Пару компонентов $y_i(t)$ и $y_j(t)$ этого процесса будем считать зависимой, если подтверждается гипотеза, согласно которой для $y_i(t)$ в выбранном классе операторов существует такой оператор $H_{ij}(I)$, зависящий от вектора параметров I , который, действуя на $y_j(t)$, дает $y_i(t)$ с точностью до случайного процесса $\varepsilon_{ij}(t)$, норма которого не превосходит заданного уровня ε :

$$y_i(t) = H_{ij}(I) [y_j(t)] + \varepsilon_{ij}(t) \quad \text{и} \quad \|\varepsilon_{ij}(t)\| \leq \varepsilon. \quad (1)$$

В такой постановке задача распадается на две. Первая — это на предыстории τ для выбранного класса операторов оптимально выбрать $H_{ij}(I)$. Оптимальность понимается в смысле минимума выбранной нормы случайного процесса $\varepsilon_{ij}(t)$:

$$\min_{I \in L} \|\varepsilon_{ij}(t)\|. \quad (2)$$

Здесь L — множество возможных значений вектора параметров I . Вторая задача — это принятие решения о зависимости или независимости компонентов путем сравнения $\|\varepsilon_{ij}(t)\|$ с уровнем значимости ε . Решая задачу таким образом, мы не сможем выделить все зависимые компоненты, но определим зависимые в указанном смысле, т. е. для выбранного класса операторов, выбранной нормы и заданного уровня значимости ε . Поэтому важным этапом является выбор оператора, который должен охваты-

вать широкий круг преобразований вариацией вектора I и выбор метрики, в которой измеряется невязка $\varepsilon_{ij}(t)$. Последнее обстоятельство по сути определяет эвристику исследователя относительно характера случайного процесса $\varepsilon_{ij}(t)$.

Рассмотрим операторы свертки, в которых ядро оператора $h_{ij}(t)$ — это физически осуществимая функция, отличная от нуля лишь на интервале $(0, T_{ij})$:

$$y_i(t + \theta_{ij}) = \int_0^{T_{ij}} h_{ij}(\tau) y_j(t - \tau) d\tau + \varepsilon_{ij}(t);$$

$$t \in \Gamma, \quad i = 1, \dots, n; \quad T_{ij} \ll \Gamma, \quad (3)$$

где хотя бы для одной из комбинаций, ij или ji , $\| \varepsilon_{ij}(t) \| \leq \varepsilon$.

Из формулы (3) видно, что ядро интегрального оператора свертки $h_{ij}(t)$ зависит от T_{ij} , а именно, отличается от нуля лишь на интервале $(0, T_{ij})$.

Из того, что модель (1) выполняется для комбинации ij , не следует, что она обязательно будет выполняться и для ji . Это связано с тем обстоятельством, что обратный оператор к (1) может не существовать. Решение будем искать в виде:

$$h_{ij}(t) = \sum_{s=1}^m h_{ijs} \varphi_s(t, T_{ij}). \quad (4)$$

Здесь $\varphi_s(t, T_{ij})$ — базисные и отличные от нуля на интервале $(0, T_{ij})$ функции. В (1) вектор параметров I , определяющий оператор, представляет собой $I = \{h_{ij}, T_{ij}, \theta_{ij}\}$. Задача сводится к определению вектора $h_{ij} = \{h_{ijs}\}$, задержки θ_{ij} и носителя базисных функций T_{ij} , минимизирующих $\| \varepsilon_{ij}(t) \|$. Отметим, что h_{ij} входит в модель линейно, а θ_{ij} и T_{ij} — нелинейно. Последнее обстоятельство определяет путь вычисления компонентов вектора I . Например, для гипотезы о том, что $\varepsilon_{ij}(t)$ — белый шум, оптимальные оценки вектора h_{ij} при условии фиксированных значений θ_{ij} и T_{ij} находятся из системы линейных уравнений [9]

$$\Psi_{ij}(T_{ij}) h_{ij} = I_{ij}(T_{ij}, \theta_{ij}). \quad (5)$$

В этом выражении матрица

$$\Psi_{ij}(T_{ij}) = \{ \psi_{ijks}(T_{ij}) \}_{k, s=1, \dots, m} \quad (6)$$

состоит из элементов

$$\psi_{ijks}(T_{ij}) = \int_0^{\Gamma} \int_0^{T_{ij}} \int_0^{T_{ij}} y_j(\tau) \varphi_k(t - \tau) \varphi_s(t - \sigma) y_j(\sigma) d\tau d\sigma dt. \quad (7)$$

Вектор в правой части

$$I_{ij}(T_{ij}, \theta_{ij}) = \{ I_{ijs}(T_{ij}, \theta_{ij}) \}_{s=1, \dots, m}$$

состоит из компонентов

$$I_{ijs}(T_{ij}, \theta_{ij}) = \int_0^{\Gamma} \int_0^{T_{ij}} y_i(t + \theta_{ij}) \varphi_s(t - \tau) y_j(\tau) d\tau dt. \quad (8)$$

Вектор $h_{ij}(0, T_{ij})$, удовлетворяющий уравнению (5), будет оптимальным при условии фиксированных значений θ_{ij} и T_{ij} . Если Θ_{ij} и T_{ij} — множество возможных значений соответственно θ_{ij} и T_{ij} , то процедура поиска глобального минимума (2) заключается в том, что для выбираемых перебором нелинейных параметров θ_{ij} и T_{ij} из Θ_{ij} и T_{ij} линейно входящие параметры h_{ij} находятся решением системы уравнений (5). Такой подход уместен при небольшой размерности нелинейно входящих в модель параметров и достаточно большой размерности вектора линейно входящих параметров.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Включение в программы, подобные программе «Предупреждение», анализа сейсмической опасности комплексных наземных и космических геофизических наблюдений на Крымском и Карпатском регионах существенно повысит надежность прогноза землетрясений на территории Украины. Кроме того, появляются возможности детального исследования природы геомагнитных аномалий в ионосфере, предшествующих сильным землетрясениям. Комплекс наблюдений на полигонах включает долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные предвестники. Также необходимо совершенствование математического обеспечения автоматизированной системы мониторинга геофизических полей, включая и данные, получаемые в космосе.

С точки зрения повышения надежности прогноза, в комплекс наземных исследований рекомендуется включить: изучение закономерностей миграции слабых толчков к месту развития магистрального разрыва; анализ отношения скоростей и амплитуд продольных и поперечных волн; наклонномерные наблюдения; анализ длиннопериодных вариаций геомагнитного поля; наблюдения электромагнитного излучения; изучение природы аномалий; гидро-геохимические наблюдения.

В процессе исследований предполагается существенно развить теорию наблюдаемых явлений. Одной из важных проблем комбинирования космических и наземных наблюдений является передача и совместная обработка геофизической информации в единой системе мониторинга.

1. Абдуллабеков К. Н. Электромагнитные явления в земной коре. — Ташкент: Фан, 1989.—232 с.
2. Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1992.—192 с.
3. Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1993.—239 с.
4. Геодинамические исследования в Украине: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1995.—210 с.
5. Голиков Ю. В., Д'Коста, Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации, возбуждаемые при сильных землетрясениях // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25.—С. 824—828.
6. Исследование геодинамических процессов на территории УССР: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1989.—122 с.
7. Коцаренко М. Я., Корепанов В. Е., вченко В. М. Дослідження іоносферних провідників землетрусів (експеримент «Попередження») // Косміч. наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 96—99.
8. Кузнецова В. Г. Изучение геодинамических процессов и предвестников землетрясений в Карпатах на основе тектономагнитных исследований // Прогноз землетрясений. — Душанбе—Москва: Донъш, 1986.—Вып. 7.—С. 219—233.
9. Мостовой С. В. Оптимальные оценки параметров геофизических полей. — К.: Наук. думка, 1987.—195 с.
10. Мостовой С. В., Мостовой В. С., Осадчук А. Е. Мониторинг сейсмоопасных зон и экологически опасных объектов с целью прогноза риска // Геофиз. журн.—1995.—15, № 2.—С. 269—275.
11. Развитие сейсмопрогностических исследований на Украине: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1984.—179 с.
12. Рахимов И. А., Ризаев К. И., Ханбердиев А. и др. Волновые возмущения электронного содержания ионосферы в период повышенной сейсмической активности. Ионосферные эффекты землетрясений. — Ашхабад, 1991.—С. 14—15.
13. Сагалова Е. А. Реализация долговременного прогноза в зоне Вранча // Геофиз. журн.—1987.—9, № 6.—С. 84—89.
14. Сейсмическое районирование территории СССР. — М: Наука, 1980.—307 с.
15. Сейсмопрогностические исследования на территории УССР (Сб. науч. тр.): — Киев: Наук. думка, 1988.—152 с.
16. Современная геодинамика и прогноз землетрясений на Украине: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1985.—100 с.
17. Современные геодинамические процессы и их изучение в связи с проблемой прогноза землетрясений: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1986.—92 с.
18. Современные геодинамические процессы и прогноз: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1987.—96 с.
19. Харин Е. П. Изменчивость передаточных функций электромагнитного поля Земли во времени // Геофиз. журн.—1981.—3, № 3.—С. 16—23.
20. Харин Е. П., Кузнецова В. Г., Гордынский Ю. М., Максимчук В. Е. Особенности временных изменений передаточных функций геомагнитного поля в Закарпатье // Геофиз. журн.—1996.—18, № 3.—С. 76—83.
21. Харитонов О. М., Костюк О. П., Кутас В. В. и др. Сейсмичность территории Украины // Геофиз. журн.—1996.—18, № 1.—С. 3—15.
22. Chmurev V. M., Isaev N. V., Bilichenko S. V., Stanev G. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an Earthquake centre // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57.—P. 100—109.
23. Davies, Baker D. M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964 // J. Geophys. Res.—1965.—70. N 9.—P. 2251—2253.
24. Gokhberg M. B., Gufeld I. L., Rozhnoy A. A. et al. Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere waveguide // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57.—P. 64—67.
25. Korepanov V., Kuznetsova V., Maksymchuk V. Tectonomagnetic Investigations as ground support of space earthquake prediction experiment // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. — Tokyo: Terrapub, 1994.—P. 489—491.
26. Larkina V. I., Migulin V. V., Molchanov O. A. et al. Some Statistical Results on very low frequency radiowave emission in the upper ionosphere over Earthquake zones // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57.—P. 100—109.
27. Mostovoy S., Mostovoy V. Seismic signal analysis and prediction the seismic events // Conseil de l'Europe: Journées Luxembourgaises de Jeodynamique (79th and 80th session). — Luxembourg: Imprimerie Joseph Beffore, 1996.—P. 40—45.
28. Mostovoy S. V., Mostovoy V. S., Osadchuk A. E. The monitoring system of ecological hazard objects // Inform. theories & application.—1996.—4, N 3.—P. 34—40.
29. Mostovoy S., Osadchuk A. Seismic dangerous areas and ecological dangerous objects // Conseil de l'Europe: Journées Luxembourgaises de Jeodynamique (79th and 80th session). — Luxembourg: Imprimerie Joseph Beffore 1996.—P. 20—28.
30. Warwick J. W. Radioastronomical techniques for the study of planetary atmospheres // Radioastronomical and satellite studies of the atmosphere / Ed. J. Aarons. — Amsterdam: North Holland, 1963.—P. 400.

GROUND-BASED OBSERVATIONS FOR PREDICTING SEISMIC EVENTS AND TECHNIQUES FOR THEIR PROCESSING AND ANALYSIS TOGETHER WITH THE DATA OF IONOSPHERE MONITORING FROM SPACE

S. Mostovoy, V. Starostenko, O. Kharitonov

Procedure of processing ground-based and space measurements of geophysical fields for the purpose of predicting earthquakes is considered. Much attention is given to the processing and analysis of those fields forerunners of seismic events were detected earlier. A mathematical model of earthquake prediction is suggested. Detection of forerunners is regarded as a problem of detecting a forerunner signal on the background of a multidimensional stochastic process which is represented by measurements of geophysical fields in the ionosphere and on the Earth's surface.