Информационные процессы, Том 17, № 2, 2017, стр. 123–136
© 2017 Гитис, Дерендяев.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обучение прогнозу землетрясений методом наименьшей тревоги[1]

В.Г. Гитис, А.Б. Дерендяев

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия
e-mail:gitis@iitp.ru

Поступила в редколлегию 08.06.2017

Аннотация—Статья развивает подход к созданию автоматической системы прогноза землетрясений. Подход не привязан к определенному типу исходных данных. Все данные о сейсмотектонических процессах отображаются с помощью пространственных и пространственно-временных полей. Поле прогноза обучается по полям-признакам и выборке прогнозируемых землетрясений. Для обучения предлагается метод минимальной тревоги. Приводятся результаты моделирования прогноза землетрясений в регионах Японии и Средиземноморья. При моделировании исследовались прогнозные поля, которые объединяют стационарные и динамические свойства сейсмического процесса. Результаты показывают эффективность применения метода наименьшей тревоги к прогнозу землетрясений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогноз землетрясений, пространственно-временные поля, метод минимальной тревоги, моделирование

1. ЗАДАЧА ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При прогнозе сейсмической опасности требуется указать пространственно-временную область, в которой ожидается эпицентр землетрясения с магнитудой не меньше заранее заданной. Данные физического моделирования разрушения горных пород и реальные наблюдения показывают, что землетрясению предшествуют аномальные процессы в области очага ожидаемого землетрясения [1–3]. Это свидетельствует в пользу того, что землетрясение может быть предсказано по локальным изменениям геологической среды. Сложность задачи обусловлена двумя факторами: недостаточной изученностью моделей сейсмичности и неполнотой исходных данных [4–6].

Для прогноза землетрясений привлекаются инструментальные наблюдения мониторинга сейсмотектонического процесса, информация о строении геологической среды и сведения об исторической сейсмичности. Эти данные разнотипны. Они могут включать в себя точечные маркированные поля, представляющие каталоги землетрясений, временные геодезические и геофизические ряды, растры дистанционного зондирования Земли и цифровые геолого-геофизические карты. Успешность прогноза землетрясений в большой степени определяется полнотой описания стационарных и динамических свойств сейсмического процесса. Для этого необходимо, чтобы технология прогноза землетрясений обеспечивала совместное использование всех типов исходных данных.

[1] Работа выполнена в Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской Академии наук. Раздел 2 выполнен за счет гранта Российского Научного фонда, проект №14-50-00150, экспериментальные исследования раздела 3 выполнены за счет грантов Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проекты №17-07-00494 и №16-07-00326.

Статья развивает предложенный в [7,8] подход к автоматическому прогнозу землетрясений. В этом подходе все типы данных о строении и изменении свойств геологической среды преобразуются в пространственные и пространственно-временные сеточные *поля-признаки*. Это обеспечивает возможность комплексной обработки данных. Система автоматического прогноза землетрясений будет с определенным шагом корректировать на карте зоны тревоги и оценивать вероятностные характеристики возможности появления в этих зонах землетрясений. В разделе 2 мы рассматриваем новый метод обучения прогнозного поля. Мы назвали этот метод методом наименьшей тревоги. В разделе 3 излагаются результаты моделирования прогноза землетрясений в регионах Японии и Средиземноморья.

2. МЕТОД НАИМЕНЬШЕЙ ТРЕВОГИ

Поле, которое используется для прогноза землетрясений (*прогнозное поле*), $\mathbf{\Phi}$, является функцией полей-признаков. Прогнозное поле обучается по ретроспективным данным с помощью методов машинного обучения [9, 10]. Данные обучения содержат выборку прогнозируемых событий $q = 1, \ldots, Q$ и описание процесса в виде набора сеточных полей-признаков $\boldsymbol{F}_i, i = 1, \ldots, I$. Поля приводятся к единой координатной сетке. Значениям полей-признаков в узлах сетки соответствуют точки I-мерного пространства признаков $\boldsymbol{f}^{(n)} = \{f_i^{(n)}\}$.

Мы предполагаем, что сильному землетрясению с магнитудой $M \geq M^*$ (*событию*) предшествуют маловероятные (*аномальные*) значения полей (*предвестники землетрясений*). Поля конструируются так, чтобы аномалии, а, следовательно, и предвестники землетрясений относились к их наибольшим или наименьшим значениям. Для простоты изложения далее будем считать, что аномальными являются только наибольшие значения полей. Это не ограничивает общности, так как любое поле с аномальными значениями, близкими к максимальным и минимальным, можно преобразовать в два поля: в первом поле все значения меньше среднего заменяются на значение среднего, а во втором поле все значения умножаются на минус единицу и затем значения меньше среднего заменяются на значение среднего.

Метод наименьшей тревоги использует следующую модель данных.

1. Прогнозируемым событиям $M \geq M^*$ предшествуют аномальные значения полей-признаков.
2. Вероятностные распределения полей-признаков $\boldsymbol{F}_i, i = 1, \ldots, I$, таковы, что аномалии приурочены к их наибольшим значениям.
3. Если событию q предшествует вектор пространства признаков $\boldsymbol{f}^{(q)} = \{f_i^{(q)}\}$, то векторы $\boldsymbol{f}^{(n)} = \{f_i^{(n)}\}$ с компонентами $f_i^{(n)} \geq f_i^{(q)}$ для всех $i = 1, \ldots, I$ также могут предшествовать прогнозируемым событиям (*условие монотонности*). Условие монотонности полей-признаков выполняется и для прогнозного поля: если событию q предшествует значение прогнозного поля $\varphi^{(q)} \in \mathbf{\Phi}$, то значения прогнозного поля $\varphi^{(n)} \geq \varphi^{(q)}$ также могут предшествовать прогнозируемым событиям.

Из последнего положения следует, что прогноз землетрясений может осуществляться с помощью простейшего порогового решающего правила, которое объявляет тревогу, если в n-м узле координатной сетки значение прогнозного поля $\varphi^{(n)}$ больше или равно порогу θ. Во многих случаях вместо применения более сложного правила объявления тревоги можно заранее выполнить эквивалентные преобразования над полями-признаками.

По полю прогноза для порога θ строится поле тревоги, в котором во всех узлах сетки со значениями $\varphi^{(n)} \geq \theta$ конструируются пространственно-временные *цилиндры тревоги*. Эти узлы сетки будем называть *опорными точками*. Цилиндр тревоги по опорной точке n с координатами $(x^{(n)}, y^{(n)}, t^{(n)})$ определяется следующим образом: центр основания цилиндра – узел с координатами $(x^{(n)}, y^{(n)}, t^{(n)} + t)$, где $0 \leq \delta t \leq \Delta T$, ΔT – шаг сетки поля по времени, радиус

основания – R и образующая – $[(x^{(n)}, y^{(n)}, t^{(n)}+\delta t), (x^{(n)}, y^{(n)}, t^{(n)}+\delta t+T)]$. Отсюда следует, что землетрясение с координатами эпицентра (x^*, y^*, t^*) будет обнаружено тогда и только тогда, если в цилиндре поля прогноза, центр основания которого находится в точке $(x^*, y^*, t^* - \delta t)$, радиус R и образующая $[(x^*, y^*, t^* - \delta t - T), (x^*, y^*, t^* - \delta t)]$, имеется хотя бы один узел сетки со значением $\varphi^{(n)} \geq \theta$. Этот цилиндр будем называть *цилиндром предвестника*.

Поле обнаруживает землетрясение, если его эпицентр попадает в область, состоящую из объединения цилиндров тревоги (*область тревоги*). Качество прогнозного поля при пороге θ определяется двумя величинами: (1) долей правильно обнаруженных событий Q^* от всех Q событий $U(\theta) = Q^*/Q$ (*уровень обнаружения*) и (2) долей числа точек сетки N^*, попадающих в область тревоги, от числа всех точек сетки N анализируемой пространственно-временной области $V(\theta) = N^*/N$ (*объем тревоги*).

Уровень обнаружения событий $U(\theta)$ при достаточно большом числе предсказываемых независимых событий является оценкой вероятности обнаружения событий при условии порога θ. Объем тревоги $V(\theta)$ показывает степень неопределенности прогноза места и времени событий. Легко видеть, что объем тревоги равен вероятности попадания в область тревоги случайного события или вероятности прогноза реального события по случайному полю. Поэтому желательно, чтобы для любого числа обнаруженных событий прогнозное поле обеспечивало бы минимальный уровень тревоги.

Рассмотрим алгоритм обучения прогнозного поля методом наименьшей тревоги. Пусть даны приведенные к единой сетке поля-признаки $\boldsymbol{F}_i$, $i = 1, \ldots, I$, и выборка эпицентров сильных землетрясений с прогнозируемыми магнитудами $M \geq M^*$.

Согласно условию монотонности для вектора пространства признаков $\boldsymbol{f}^*$ опорными точками цилиндров тревоги являются узлы координатной сетки, в которых $f_i^{(n)} \geq f_i^*$ по всем $i = 1, \ldots, I$. Предвестником события q будем называть вектор $\boldsymbol{f}^{(q)}$, относящийся к такому узлу координатной сетки цилиндра предвестника события q, у которого объем тревоги $v^{(q)} = N^{(q)}/N$ является минимальным среди всех узлов сетки этого цилиндра, где N – все узлы сетки анализируемой области, $N^{(q)}$ – узлы сетки области тревоги, порождаемой опорными точками вектора $\boldsymbol{f}^{(q)}$. Очевидно, что при сокращении размерности пространства признаков до $J < I$ опорные точки для события q будут включать в себя все предыдущие опорные точки I-мерного пространства признаков и дополнительные точки, которые могут добавиться из-за уменьшения числа ограничений, задаваемых неравенствами $f_i^{(n)} \geq f_i^{(q)}$. Таким образом, по определению каждому событию q соответствуют предвестник $\boldsymbol{f}^{(q)}$ и минимальный для данного пространства признаков объем тревоги $v^{(q)}$.

Для обнаружения событий по значениям прогнозного поля используется пороговый детектор. Значения порога θ определяется перебором. При этом значение порога уменьшается, начиная от максимального значения прогнозного поля. По мере уменьшения порога количество обнаруженных событий и объем тревоги увеличиваются. Тем самым определяется как последовательность обнаруживаемых событий $q(\theta)$, так и функция увеличения объема тревоги $V(\theta)$. Очевидно, что этой последовательности событий соответствует последовательность выбора узлов сетки полей-признаков со значениями предвестников $\boldsymbol{f}^{(q)} = \{f_i^{(q)}\}$ в пространстве признаков. Алгоритм наименьшей тревоги позволяет организовать прогнозное так, чтобы при уменьшении значения порога θ узлы сетки со значениями предвестников $\varphi^{(q(\theta))}$, а следовательно, обнаруживаемые события $q(\theta)$, выбирались в любой последовательности.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Сгенерировать учебную выборку $\{\boldsymbol{f}^{(q)}, v^{(q)}\}$, которая состоит из предвестников землетрясений $\boldsymbol{f}^{(q)}$ и соответствующих им объемов тревоги $v^{(q)}$.
2. Упорядочить предвестники $\boldsymbol{f}^{(q)}$, $q = 1, \ldots, Q$, по любому правилу пользователя.

3. Присвоить всем узлам сетки прогнозного поля $\mathbf{\Phi}$ значение 0.
4. Заменить в узлах сетки прогнозного поля, для которых выполняется условие монотонности $f_i^{(n)} \geq f_i^{(Q)}$ по всем $i = 1, \ldots, I$, значение 0 на Q; заменить в узлах сетки прогнозного поля, для которых выполняется условие монотонности $f_i^{(n)} \geq f_i^{(Q-1)}$ по всем $i = 1, \ldots, I$, значение 0 на $Q-1$ и далее аналогично заменять в узлах сетки прогнозного поля, для которых выполняется условие монотонности $f_i^{(n)} \geq f_i^{(Q-q)}$ по всем $i = 1, \ldots, I$, значения 0 на $Q+1-q$.

Предложенный алгоритм обучения является непараметрическим. На 1-м шаге алгоритма для каждого события мы находим в соответствующем цилиндре предвестника точку с минимальным объемом тревоги для заданного набора полей-признаков. На 2-м шаге алгоритма мы устанавливаем порядок следования событий, в котором они должны выбираться по прогнозному полю при уменьшении значения порогового детектора. Шаги 3 и 4 определяют значения прогнозного поля так, чтобы при уменьшении значения порога θ события обнаруживались в последовательности $Q, Q-1, \ldots, q, \ldots, 1$. Для первого события Q объем тревоги будет наименьшим и равным $v^{(Q)}$. Вторым обнаруживается событие $Q-1$. Опорные точки цилиндров тревоги Q-го и $(Q-1)$-го событий в пространстве признаков в общем случае пересекаются. Поэтому в прогнозном поле при обнаружении этих двух событий объем тревоги $v^{(Q)}$ будет увеличен только за счет тех узлов сетки области тревоги события $(Q-1)$, которые не попадают в область тревоги Q-го события и т.д.

Таким образом, можно видеть, что выбор порядка следования предвестников событий на 2-м шаге алгоритма определяет получаемую по прогнозному полю зависимость $U(V)$. Наиболее просто упорядочить предвестники по уменьшению объемов тревоги $v^{(1)} \geq v^{(2)} \geq \ldots v^{(q)} \geq \ldots \geq v^{(Q)}$. Другой способ упорядочивания предвестников позволяет оптимизировать прогнозное поле по величине приращения объема тревоги. Для этого надо упорядочить события так, чтобы при переходе от обнаружения события $q+1$ к событию q увеличение объема тревоги было минимальным. Можно также упорядочить события так, чтобы прогнозное поле обнаруживало заданное число событий с минимальным объемом тревоги. Однако этот способ для большого числа событий требует значительного перебора.

С ростом объема учебной выборки событий увеличивается точность представления вероятностного распределения предвестников землетрясений. Это повышает состоятельность оценок вероятности обнаружения событий. Однако увеличение точности прогноза в основном зависит от того, насколько полно поля-признаки представляют сейсмотектонические процессы, предшествующие землетрясениям.

После нахождения прогнозного поля требуется установить величину порога, по которой принимается решение об объявлении тревоги на тестовом материале, не участвующем в обучении. Значение порога θ может определяться по величине приемлемого объема тревоги. Более обоснованное решение обычно определяется соотношением уровня обнаружения событий U и объема тревоги V. Для выбора порога удобно использовать функцию $U(V)$. Зависимость $U(V)$ напоминает общепринятую Рабочую характеристику приемника (РХП) [11]. Отличие состоит в том, что в РХП V обозначало бы долю ложных тревог, после которых землетрясения не наблюдались. В нашем случае использование понятия ложной тревоги может привести к получению тривиальных результатов. Действительно, с формальной точки зрения размер цилиндрической области тревоги можно установить любым. Например, если размер области тревоги будет совпадать со всей областью прогнозирования, то для любого поля уровень прогноза будет составлять 100%, число ложных тревог будет равно 0, но объем тревоги будет равен 100%, что показывает на неопределенность прогноза. Выбор порога θ обычно сводится к максимизации взвешенной разности вероятностей обнаружения событий прогнозным и слу-

чайным полем: $\theta = \arg\max\limits_{<\theta>}\{C_1U(\theta) - C_2V(\theta)\}$. Отсюда θ находится из $\partial U(\theta)/\partial V(\theta) = C_2/C_1$, где C_1 и C_2 – цены.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

3.1. Методика

В режиме автоматического прогноза на каждом временном шаге сетки происходит обучение поля прогноза по прошлым данным и принимается решение о назначении области тревоги соответствующего t-го шага сетки. При этом поле тревоги систематически корректируется с интервалом ΔT: на очередном t-м временном срезе у нее исчезают цилиндры тревоги, сгенерированные в момент $t - T$, и добавляются цилиндры тревоги, сгенерированные в момент t. Одновременно по данным обучения до момента t оцениваются характеристики, которые определяют возможность появления в области тревоги, относящейся к временному срезу t, эпицентров землетрясений. Характеристиками, которые представляют средние параметры обучения, являются уровень обнаружения $U(\theta)$, объем тревоги $V(\theta)$ и среднее число обнаруженных событий $\omega_{mean}(T_{test}) = q^*T_{test}/T_0$ за временной интервал T_{test}, где q^* – число обнаруженных событий на интервале обучения T_0.

Целью моделирования является оценивание характеристик прогноза на ретроспективных данных, которые не использовались при обучении.

В параметрических правилах прогноза по результатам обучения находится прогнозное правило. Далее это правило применяется для построения прогнозного поля на любом временном интервале, в том числе и на том, который не участвовал в обучении. Этот способ моделирования полностью совпадает с реальным режимом работы системы.

Алгоритм минимальной тревоги является непараметрическим. На временном интервале обучения от 0 до T_0 алгоритм вычисляет только прогнозное поле и поле тревоги на интервале от 0 до $T_0 + T$. При моделировании здесь возможны два варианта: (1) точное моделирование прогноза в реальном режиме работы и (2) моделирование прогноза "на сегодня"для интервала тревоги $T_{test} \le T$. В первом случае схема моделирования имеет вид: обучение на интервале от 0 до T_0, тестирование на интервале от T_0 до $T_0 + \Delta T$. Во втором случае схема моделирования имеет вид: обучение на интервале от 0 до T_0, тестирование на интервале от T_0 до $T_0 + T_{test}$, где $T_{test} \le T$. Мы используем при моделировании вторую схему.

Карты временных срезов области тревоги имеют различные зоны тревоги. Пусть интервал обучения завершается на временном срезе t поля тревоги. При тестировании качества прогноза в первом приближении можно принять, что все срезы области тревоги продолжительностью от t до $t + T_{test}$ повторяют зону тревоги на t-м временном срезе. Тогда оценка числа ожидаемых после t-го временного среза событий имеет вид $\omega_t(T_{test}) = Q^*S_t^*(T_{test} + \Delta T)/N^*\Delta T$, где S_t^* – число узлов сетки поля тревоги на t-м временном срезе, N^* – число узлов сетки во всей области тревоги на интервале обучения, T_{test} – задаваемое пользователем время ожидания землетрясений, ΔT – шаг сетки поля по времени.

Для моделирования прогноза землетрясений используются инструменты ГИС ГеоТайм 3 http://geo.iitp.ru/GT3/ [12]. Моделирование выполняется для регионов Японии и Средиземноморья. В качестве исходных данных взяты имеющиеся в открытом доступе сети Интернет каталоги землетрясений на временном интервале от 01.01.1990 до 04.01.2017 гг.

Моделирование выполняется по следующей схеме. Из исходного каталога землетрясений выделяются подкаталог событий для вычисления полей-признаков и подкаталог прогнозируемых событий. Поля-признаки оцениваются в пространственно-временных окнах. Поэтому их значения известны, начиная с 1995 г. После этих подготовительных операций начинается цикл, состоящий из этапов обучения и тестирования. При обучении использовалось опция

алгоритма минимальной тревоги, в которой предвестники землетрясений упорядочиваются по уменьшению объемов тревоги. На первом шаге цикла по полям-признакам и подкаталогу прогнозируемых событий на интервале от 01.01.1995 до 31.12.2004 гг. производится обучение первого прогнозного поля. Затем обученное прогнозное поле тестируется по прогнозируемым землетрясениям, произошедшим на интервале от 01.01.2005 г. до 01.01.2005+T, где T – временной интервал тревоги. Далее интервал обучения увеличивается на время интервала тревоги T и выполнялся следующий шаг обучения прогнозного поля и его тестирования. Процедура повторяется до 2016 г.

3.2. Регион Японии

Регион анализа мы ограничили полигоном $128^\circ - 146^\circ$ в.д., $29^\circ - 44^\circ$ с.ш. Сейсмический процесс представлен каталогом землетрясений за 01.01.1990-04.01.2017 гг., взятом с сайта Международного сейсмологического центра (ISC) www.isc.ac.uk. Каталоги землетрясений ISC содержат информацию, получаемую от многих сейсмологических центров, в которых сила землетрясений измеряется в различных магнитудных шкалах. Для данного эксперимента мы выбрали из каталога только землетрясения, зарегистрированные Японским Метеорологическим Агенством (Japan Meteorological Agency, JMA), с магнитудами M=2-9 и с глубинами гипоцентров от 0 до 600 км.

Оценка усредненной по региону минимальной представительной магнитуды землетрясений оказалась равной 2.5. Подкаталог для оценивания полей-признаков состоит из 263395 землетрясений с магнитудами $M \geq 2.5$ и глубинами гипоцентров $H \leq 300$ км. Пространственно-временные поля-признаки вычислены в координатной сетке с шагом 0.2° по долготе, 0.15° по широте и 60 суток 3 часа 45 мин по временной оси. Второй подкаталог включает в себя прогнозируемые землетрясения. Он состоит из очищенных от афтершоков 162 землетрясений[1] с магнитудами $M \geq 6.0$ и с глубинами гипоцентров $H \leq 100$ км. Для моделирования прогноза в регионе анализа выбрана сейсмически активная зона, для которой в любом круге радиуса R=100 км за период 1990-2004 гг. имеется не менее 300 эпицентров землетрясений. Регион анализа, сейсмически активная зона и эпицентры очищенных от афтершоков землетрясений за 1990-2016 гг. с магнитудами $M \geq 6.0$ и глубинами $H \leq 100$км, показаны на Рис. 1.

При моделировании прогнозное поле обучалось по четырем полям-признакам:

1. Пространственно-временное поле изменений во времени (аномалий) плотности эпицентров землетрясений со значениями меньше 0.
2. Пространственно-временное поле аномалий плотности эпицентров землетрясений со значениями больше 0.
3. Пространственно-временное поле аномалий средней магнитуды землетрясений.
4. Пространственное поле плотности эпицентров землетрясений.

Пространственно-временные поля плотности эпицентров землетрясений и средней магнитуды землетрясений вычислены с помощью метода адаптивного взвешенного сглаживания (AWS) [14, 15]. Значения полей аномалий плотности эпицентров и средней магнитуды землетрясений являются оценками статистики Стьюдента

$$\tau = (A_2 - A_1)\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{(n_1 + n_2)(s_1^2 + s_2^2)}},$$

где: n_1 и n_2 число временных срезов на фоновом и тестовом интервалах, для аномалий плотности эпицентров интервал фоновых значений T_1=1095 суток и тестовый интервал T_2=241

[1] Для очистки каталога от афтершоков использовалась программа В.Б. Смирнова [13].

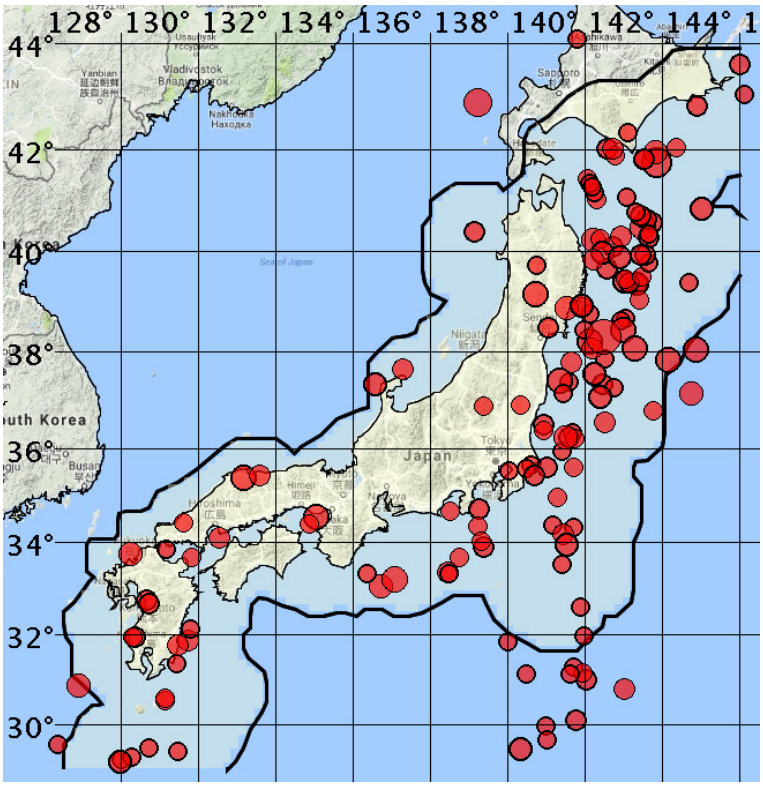

Рис. 1. Регион анализа, сейсмически активная зона и эпицентры прогнозируемых землетрясений за 1990-2016 гг.

суток, а для аномалий средней магнитуды землетрясений взяты интервалы T_1=1825 суток и T_2=241 суток; A_1 и A_2 обозначают средние значения полей на интервалах T_1 и T_2; величины s_1^2 и s_1^2 являются суммами квадратов отклонения значений полей от средних. Если статистика τ близка к 0, то значения полей на фоновом и тестовом интервалах близки по сравнению с их стандартными отклонениями. Чем больше значение статистики $|\tau|$, тем с большей уверенностью мы можем предполагать, что поле на интервале T_2 значимо изменилось по сравнению с интервалом T_1. Пространственное поле плотности эпицентров землетрясений вычислялось по каталогу землетрясений на временном интервале от 01.01.1990 до 31.12.2004 гг. с экспоненциальной ядерной функцией при радиусе окна 50 км. В сейсмически активную пространственно-временную область на интервале 1995-2016 гг. попадает 96 прогнозируемых событий.

На Рис. 2 показаны графики зависимостей уровня обнаружения событий от объема тревоги $U(V)$ для полей-признаков и вычисленного по ним прогнозного поля. Поля 1, 2 и 3 вычислены по каталогу землетрясений на интервале 01.01.1990-2010 гг. Пространственное поле 4 вычислено по данным 1990-2004 гг. Прогнозное поле обучено по 59 событиям при параметрах тревоги R=15 км, T=365 суток. Графики 1 и 2 показывают зависимости $U(V)$ для пространственно-временных полей отрицательных и положительных аномалий плотности эпицентров землетрясений. График 3 показывает зависимость $U(V)$ для 3D поля положительных аномалий средней магнитуды землетрясений. График 4 показывает зависимость $U(V)$ для 2D поля плотности эпицентров землетрясений. График 5 показывает зависимость $U(V)$ для вычисленного 3D поля прогноза. Можно видеть, что наилучший среди полей-признаков результат обнаружения событий дает пространственное поле плотности землетрясений. Поле прогноза, обученное по методу минимальной тревоги, существенно улучшает характеристику $U(V)$, так например, при объеме тревоги $V = 0.1$ уровень обнаружения прогнозного поля в 2 раза превышает уровень обнаружения пространственного поля плотности землетрясений.

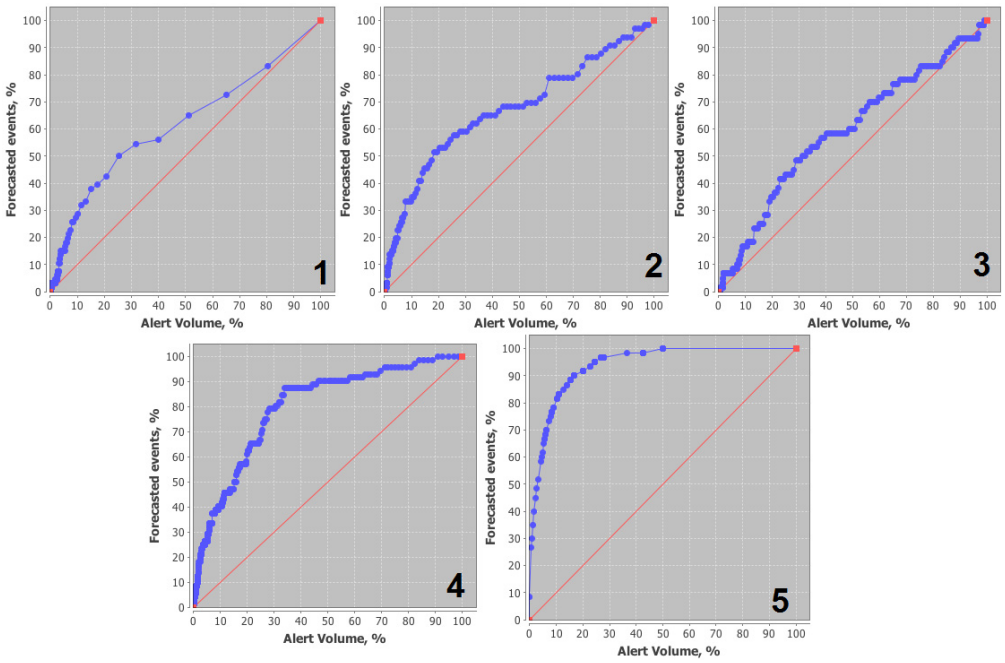

Рис. 2. Графики зависимости $U(V)$ в процентах при параметрах тревоги R=15 км, T=365 суток: (1) 3D поле отрицательных аномалий плотности эпицентров землетрясений, (2) 3D поле положительных аномалий плотности эпицентров землетрясений, (3) 3D поле положительных аномалий средней магнитуды землетрясений, (4) 2D поле плотности эпицентров землетрясений (5) 3D поле прогноза. Зависимость $U(V) = V$ показана на графиках красной линией.

Рассмотрим результаты тестирования прогнозного поля с параметрами R=15 км $T = 365$ суток. На Рис 3 и 4 показаны два примера карт зон тревоги на последних временных срезах полей тревоги 2010 и 2013 гг. На Рис. 3 видно, что в 2011 г. в анализируемую область попало 10 эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$. При этом обученные по данным до 2010 г. зоны тревоги при $V_1 = 0.1$ и $V_2 = 0.2$ обнаруживают соответственно 5 и 8 эпицентров землетрясений. На Рис. 4 видно, что в 2014 г. в анализируемую область попало 5 эпицентров землетрясений. При этом обученные по данным до 2013 г. зоны тревоги при $V_1 = 0.1$ и $V_2 = 0.2$ обнаруживают только 1 эпицентр землетрясения.

В Таблицах 1, 2 и 3 представлены некоторые характеристики обучения и тестирования. При обучении прогнозного поля использовались от 33 до 96 событий. В тестировании участвовало 64 события, которые при обучении не использовались. Таблицы 1 и 2 содержат результаты моделирования прогноза с параметрами цилиндров тревоги R=15 км, T=365 суток. При прогнозе с объемом тревоги $V_1 = 0.1$ из 64 событий было обнаружено 28, что составляет $U_{test1} = 0.44$. При прогнозе с объемом тревоги $V = 0.2$ из 64 событий было обнаружено 45, что составляет $U_{test2} = 0.70$. В Таблице 3 представлены результаты моделирования прогноза с параметрами цилиндров тревоги R=16 км, T=730 суток. При прогнозе с объемом тревоги $V_3 = 0.1$ из 64 событий было обнаружено 36, что составляет $U_{test3} = 0.56$. Таким образом, в первом случае получаем, что оценка вероятности обнаружения событий U_{tes1t} превышает вероятность случайного обнаружения событий V_1 в $U_{test1}/V_1 = 4.4$ раза, во втором случае – в $U_{test2}/V_2 = 3.5$ раза и в третьем случае – в $U_{test3}/V_3 = 5.6$ раза.

3.3. Регион Средиземноморья

Регион анализа мы ограничили полигоном $8° - 32°$ в.д., $33° - 48°$ с.ш. Каталог землетрясений взят с сайта Международного сейсмологического центра (ISC) www.isc.ac.uk. Из каталога

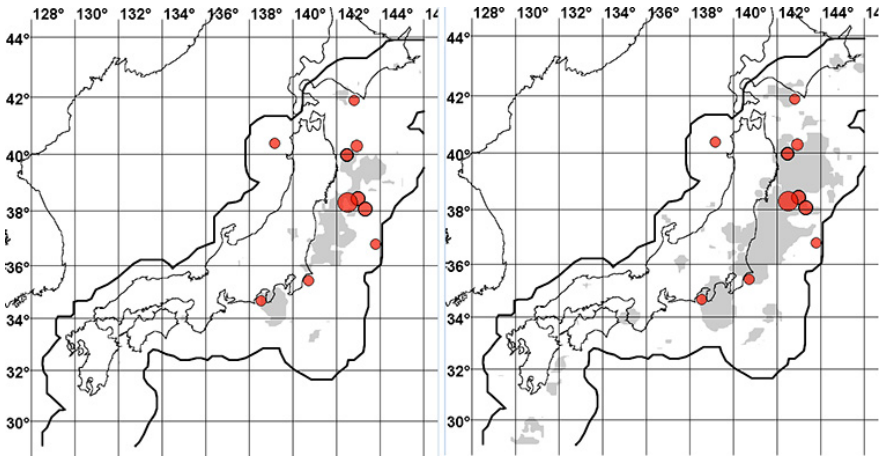

Рис. 3. Зоны тревоги на декабрь 2010 г., обученные по данным 1995-2010 гг. для объемов тревоги (слева-направо) V_1=0.1 и V_2=0.2, и эпицентры землетрясений 2011 г.

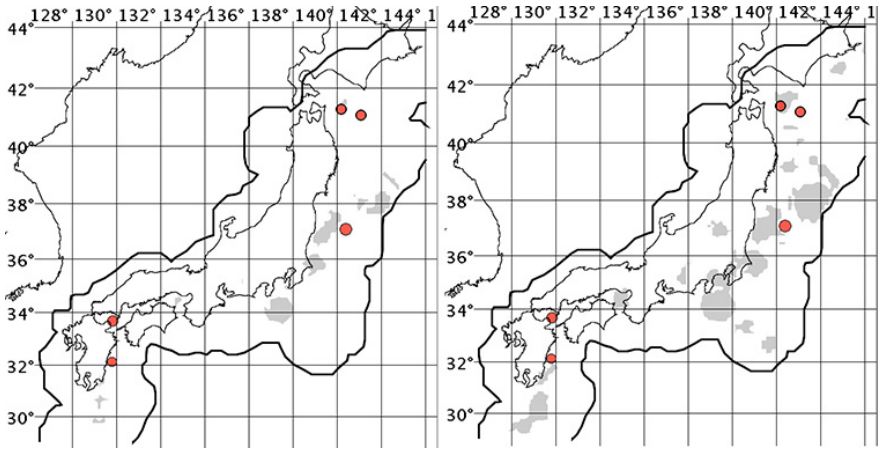

Рис. 4. Зоны тревоги на декабрь 2013 г., обученные по данным 1995-2013 гг. для объемов тревоги (слева-направо) V_1=0.1 и V_2=0.2, и эпицентры землетрясений 2014 г.

Таблица 1. Результаты моделирования при R=15 км, T=365 суток, $V_1 = 0.1$

Обучение			Тестирование			
Интервал обучения	Число событий	Вероятность обнаружения U_1	Интервал прогноза	Число событий	Число успехов	Число ожидаемых событий $\omega_t(T_{test1})$
1995-2004	33	0.85	2005	10	9	4.5
1995-2005	43	0.82	2006	1	0	3
1995-2006	44	0.84	2007	3	1	3.3
1995-2007	47	0.80	2008	8	4	2.1
1995-2008	55	0.80	2009	2	0	3.2
1995-2009	57	0.80	2010	2	1	3.7
1995-2010	59	0.80	2011	10	5	2.5
1995-2011	69	0.80	2012	6	3	6.2
1995-2012	75	0.76	2013	3	0	2.8
1995-2013	78	0.75	2014	5	1	1.4
1995-2014	83	0.75	2015	5	1	1.7
1995-2015	89	0.72	2016	9	3	2.2
1995-2016	96	0.70	2017	-	-	5.8

Таблица 2. Результаты моделирования при R=15 км, T=365 суток, $V_2 = 0.2$

Обучение			Тестирование			
Интервал обучения	Число событий	Вероятность обнаружения U_2	Интервал прогноза	Число событий	Число успехов	Число ожидаемых событий $\omega_t(T_{test2})$
1995-2004	33	0.90	2005	10	9	4.3
1995-2005	43	0.92	2006	1	0	3.4
1995-2006	44	0.92	2007	3	1	3.5
1995-2007	47	0.91	2008	8	4	2.8
1995-2008	55	0.92	2009	2	0	3.5
1995-2009	57	0.93	2010	2	1	3.8
1995-2010	59	0.92	2011	10	5	3.7
1995-2011	69	0.91	2012	6	3	6.2
1995-2012	75	0.90	2013	3	0	3.7
1995-2013	78	0.89	2014	5	1	2.3
1995-2014	83	0.88	2015	5	1	2.5
1995-2015	89	0.86	2016	9	3	3.4
1995-2016	96	0.86	2017	-	-	5.3

Таблица 3. Результаты моделирования при R=16 км, T=730 суток, $V_3 = 0.1$

Обучение			Тестирование			
Интервал обучения	Число событий	Вероятность обнаружения U_3	Интервал прогноза	Число событий	Число успехов	Число ожидаемых событий $\omega_t(T_{test3})$
1995-2004	33	95	2005-2006	11	10	9
1995-2006	44	78	2007-2008	11	7	5
1995-2008	55	73	2009-2010	4	2	4.5
1995-2010	59	71	2011-2012	16	7	5
1995-2012	75	73	2013-2014	8	3	8.6
1995-2014	83	70	2015-2016	13	7	1.9
1995-2016	96	67	2017-2018	-	-	7

мы выбрали землетрясения за период 01.01.1990 - 10.01.2017 гг. с глубиной гипоцентров до 120 км. Оценка усредненной по этим данным минимальной представительной магнитуды землетрясений равна 2.7.

Каталог для оценивания полей-признаков включает в себя 181285 землетрясений с магнитудами $M \geq 2.7$ и глубинами гипоцентров $H \leq 120$ км. Второй каталог содержит выборку прогнозируемых событий. Он включает в себя 21 землетрясение с магнитудами $M \geq 6.0$ и с глубинами гипоцентров $H \leq 60$ км. Для моделирования в регионе анализа выбрана сейсмически активная зона, для которой в любом круге радиуса R=100 км за период 1990-2004 гг. имеется не менее 300 эпицентров землетрясений (Рис. 5). При моделировании прогноза сеточные поля вычислялись в координатной сетке с шагом 0.2° по долготе, 0.15° по широте и 50 суток 1 час 2 мин по временной оси.

В каталогах, используемых для моделирования, как и в исходном каталоге ISC смешаны землетрясения в различных магнитудных шкалах. Мы анализировали три поля-признака: пространственное поле плотности эпицентров и пространственно-временные поля изменений во времени (аномалий) плотности эпицентров и средней магнитуды землетрясений.

Минимальная представительная магнитуда землетрясений вычислялась для всего региона в целом. Поэтому можно считать, что оценки плотности эпицентров землетрясений мало зависят от типов магнитудных шкал землетрясений. Средняя магнитуда землетрясений и ее изменение оценивались в достаточно большом пространственно-временном окне. Механизм выбора шкал для оценки магнитуд землетрясений в каталоге нам неизвестен. Поэтому нет оснований утверждать, что оценки значений средних магнитуд землетрясений и их изменений являются несмещенными.

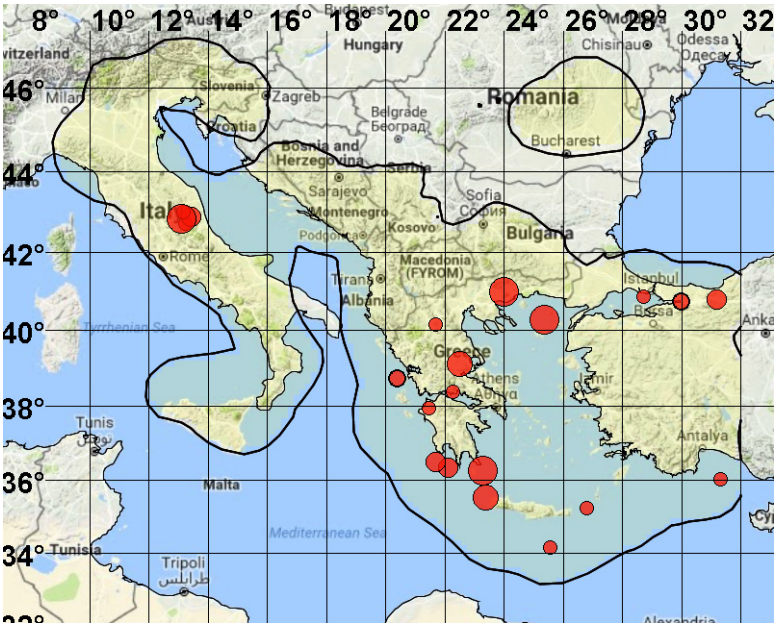

Рис. 5. Анализируемая сейсмически активная зона и эпицентры землетрясений за 1990-2017 гг. с магнитудами $M \geq 6.0$ и глубинами гипоцентров $H \leq 60$ км.

Пространственное поле плотности эпицентров землетрясений и пространственно-временные поле средней магнитуды землетрясений вычислены с экспоненциальной ядерной функцией. Поле плотности эпицентров вычислялось с радиусом окна 50 км по данным на временном интервале от 01.01.1990 до 31.12.2004 гг. Поле средней магнитуды землетрясений вычислялось с радиусом 100 км и временным интервалом 1825 суток. Пространственно-временное поле плот-

ности эпицентров землетрясений вычислено с помощью метода AWS [14, 15]. Поля аномалий плотности эпицентров и средней магнитуды землетрясений являются оценками статистики Стьюдента (см. Раздел 3.2) для временных интервалов T_1=1095 и T_2=201 суток.

Для учета времени формирования полей-признаков прогноза и оценивания первого среза поля тревоги начало прогноза отнесено к 01.01.1995 г. В сейсмически активную пространственно-временную область попадает 19 из 21 прогнозируемых событий.

Наилучший среди полей-признаков уровень обнаружения событий с магнитудой $M \geq 6.0$ дает поле плотности эпицентров землетрясений. Прогнозные поля для всех интервалов обучения дают существенное улучшение зависимости $U(V)$.

Результаты моделирования сведены в таблице 4. При обучении прогнозного поля использовались от 6 до 19 событий. В тестовый интервал попало 13 событий, которые не участвовали в обучении. Параметры поля тревоги составляют: цилиндр тревоги R=20 км, T=730 суток, объем тревоги $V_4 = 0.1$. Из Таблицы видно: при тестировании из 13 событий было обнаружено 8, что составляет $U_{test4} = 0.69$. Таким образом получаем, что оценка вероятности обнаружения событий U_{test4} превышает вероятность случайного обнаружения V_4 в $U_{test4}/V_4 = 6.9$ раза.

Таблица 4. Результаты моделирования при R=20 км, T=730 суток, $V_4 = 0.1$

Обучение			Тестирование			
Интервал обучения	Число событий	Вероятность обнаружения U_4	Интервал прогноза	Число событий	Число успехов	Число ожидаемых событий $\omega_t(T_{test4})$
1995-2004	6	0.83	2005-2006	1	0	1.25
1995-2006	7	0.71	2007-2008	2	1	0.85
1995-2008	9	0.80	2009-2010	1	0	0.85
1995-2010	10	0.80	2011-2012	0	0	0.07
1995-2012	10	0.80	2013-2014	3	1	2.5
1995-2014	13	0.77	2015-2016	6	6	2.4
1995-2016	19	0.84	2017-2018	-	-	2.15

На Рис. 6 показаны карты временных срезов полей тревоги (зоны тревоги), которые построены по данным 1995-2010 и 1995-2014 гг. соответственно и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$, которые произошли на тестовых интервалах 2011-2012 и 2015-2016 гг. Пороги тревоги выбраны для объема тревоги $V_4 = 0.1$. Оценки числа ожидаемых в зонах тревоги землетрясений с $M \geq 6.0$ на тестовых интервалах 2011-2012 и 2015-2016 гг. равны $\omega_{2011}(T_{test4}) = 0.07$ и $\omega_{2014}(T_{test4}) = 2.4$. На интервале 2011-2012 гг. в области анализа землетрясения не наблюдались. На интервале 2015-2016 гг. все землетрясения предсказаны верно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья развивает подход к созданию автоматической системы прогноза землетрясений. Подход не привязан к определенному типу исходных данных. В нем все типы данных о сейсмотектонических процессах отображаются с помощью пространственных и пространственно-временных полей-признаков. Предполагается, что маловероятные (аномальные) значения полей, близкие к их максимальным либо минимальным значениям, связаны с местом и временем подготовки очага землетрясения полей. Система будет автоматически с определенным временным шагом строить карты тревоги, на которых будут показаны зоны ожидаемых землетрясений и даны вероятностные оценки прогноза.

В статье предлагается метод минимальной тревоги, предназначенный для обучения поля прогноза. Обучение ведется по ретроспективным данным, которые включают в себя поля-признаки и выборку прогнозируемых событий. Модель данных метода минимальной тревоги предполагает, что предвестниками сильных землетрясений являются аномальные значения

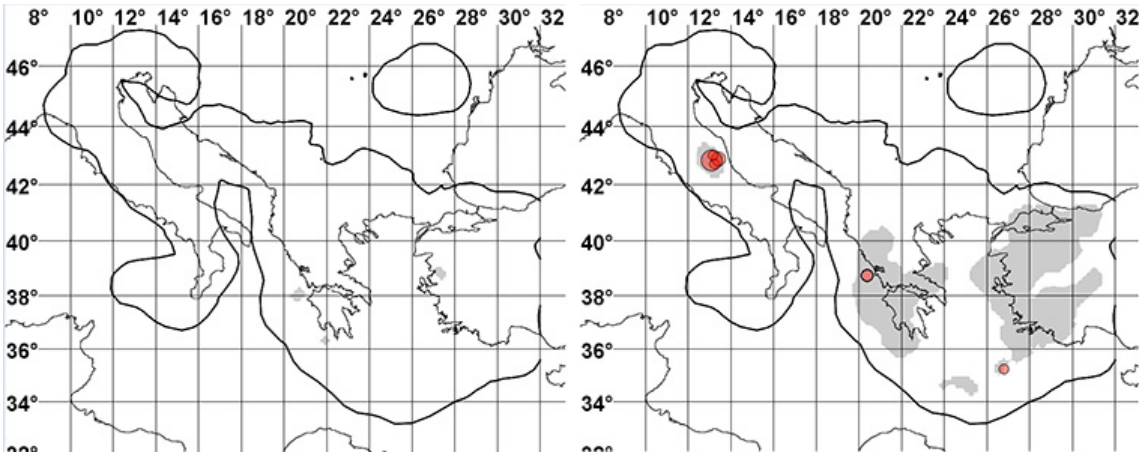

Рис. 6. Зоны тревоги на декабрь (слева-направо) 2010 г. и 2014 гг., обученные по данным 1995-2010 гг. и 1995-2014 гг. для объема тревоги V_1=0.1, и эпицентры землетрясений 2014 г.

полей-признаков, приуроченные к их наибольшим значениям, и что значения полей-признаков, превышающие или равные значениям предвестников произошедших ранее землетрясений, также могут быть предвестниками землетрясений. Показано, что алгоритм минимальной тревоги строит прогнозное поле так, что на материале обучения оно обеспечивает при уменьшении значения порогового детектора обнаружение событий в любой заранее заданной последовательности. В частности, прогнозное поле можно построить так, чтобы при увеличении числа обнаруживаемых при обучении событий приращения объема тревоги были минимальными.

Алгоритм наименьшей тревоги относится к непараметрическим методам машинного обучения. С увеличение числа событий в учебной выборке повышается состоятельность оценок вероятности обнаружения и прогноза событий. Точность прогноза в большей степени зависит от того, насколько полно поля-признаки представляют сейсмотектонические процессы, предшествующие землетрясениям.

Моделирование выполнялось с помощью ГИС ГеоТайм 3 по данным каталогов землетрясений, загруженных с сайта ISC. Исследуемые прогнозные поля объединяли стационарные и динамические свойства сейсмического процесса. Эксперименты показали эффективность применения метода наименьшей тревоги.

Метод минимальной тревоги может применяться для прогноза редких событий в природных и технических системах в предположении, что эти события, связаны с предыдущими состояниями системы. Для процессов в окружающей среды такими событиями могут быть природные катастрофы определенной силы, а для процессов в технических системах – отказы. Процессы могут быть представлены временными рядами или пространственно-временными полями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993.
2. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. МАИК "Наука/Интерпериодика"2003. 270 с.
3. Keilis-Borok V., Soloviev A. A. (ed.). Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. Springer Science & Business Media, 2013. 337 p.
4. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006
5. Shebalin, P. N., Narteau, C., Zechar, J. D., & Holschneider, M. Combining earthquake forecasts using differential probability gains // Earth, Planets and Space, 66(1). 2014. pp. 1-14.

6. Amei A., Fu W., Ho C. H. Time series analysis for predicting the occurrences of large scale earthquakes // Intrn. Journ. of Applied Science and Technology. 2012. T. 2. № 7.

7. Гитис В. Г., Дерендяев А. Б. Подход к автоматическому прогнозу землетрясений // Информационные процессы. 2016. Т. 16. №. 2. С. 121-130.

8. Gitis V. G., Derendyaev A. B. An approach to the automatic prediction of earthquakes // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. T. 61, №12 pp.1466-1473.

9. Bishop, Christopher M. Machine learning and pattern recognition. Information Science and Statistics. Springer. Heidelberg. 2006.

10. В.В. Вьюгин. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. 2013. 390 с.

11. Харкевич А. А. Борьба с помехами. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965. 280 с.

12. Гитис В.Г. Геоинформационные технологии для научных исследований // Вестник РФФИ, №2-3 (70-71), апрель-сентябрь 2011. с. 13-32.

13. Smirnov, V.B., Estimating the duration of the lithospheric failure cycle from Earthquake catalogs. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 39, pp. 794–811. 2003.

14. Polzehl, J., & Spokoiny, V. Propagation-separation approach for local likelihood estimation. // Probability Theory and Related Fields. 2006. 135(3). 335-362.

15. Gitis, V.G., Derendyaev A.B., Pirogov, S.A., Spokoiny, V.G., Yurkov, E.F. Adaptive Estimation of Seismic Parameter Fields from Earthquake Catalogs. // Journal of Communications Technology and Electronics. Vol. 60, No. 12, 2015. pp. 1459–1465.

Learning for earthquake prediction using the least alarm method

Gitis V.G., Derendyaev A.B.

The article develops an approach to the creation of an automatic earthquake prediction system. The approach is not tied to a specific type of source data. All data on seismotectonic processes are presented using spatial and space-time fields. The forecast field is learned by the field-features and the sample of the predicted earthquakes. The least alarm method is offered for training. The results of modeling the earthquake prediction in the regions of Japan and the Mediterranean are presented. In modeling, predictive fields were investigated that combine the stationary and dynamic properties of the seismic process. The results show the effectiveness of applying the least alarm method to the forecast of earthquakes.

KEYWORDS: earthquake prediction, space-time fields, least alarm method, modeling.