

Исследование предвестников сильных землетрясений, вычисленных по данным космической геодезии¹

Валерий Гитис*, Михаил Родкин**,***, Александр Дерендяев*, Янь Цян
Ву****, Цзин Ян Чжао****

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

**Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, Российская академия наук, Москва, Россия

***Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

****Первый центр мониторинга и приложений, Китайское Административное Управление по землетрясениям, Тяньцзинь, 300180, Китай

Поступила в редколлегию 17.09.2022

Аннотация—Ряд сейсмоактивных регионов оборудован достаточно плотными сетями приемных станций GPS, осуществляющих мониторинг смещений поверхности земли. В статье рассматриваются экспериментальные результаты и геофизическая интерпретация оценки эффективности предвестников землетрясений, вычисленных по данным космической геодезии. Предвестник является эффективным для прогноза, если перед сильными землетрясениями в окрестности их эпицентров значения поля этого предвестника в большинстве случаев принимают аномальные значения, а в местах, где сильные землетрясения не ожидаются, подобные значения наблюдаются много реже. Результаты статьи получены по данным резко различающихся по сеймотектоническим условиям регионов Японии и Калифорнии. Данные космической геодезии представлены среднесуточными временными рядами горизонтальных смещений поверхности земли. Для прогноза землетрясений использовался метод минимальной области тревоги. Показана статистическая значимость эффективности использования в качестве предвестников землетрясений пространственно-временных полей изменения инвариантов скорости деформаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: машинное обучение, геоинформационные технологии, прогноз землетрясений, сейсмическая опасность.

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_3_220

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для ряда сейсмоактивных регионов в режиме реального времени публикуются данные мониторинга смещения земной поверхности, полученные с помощью Глобальной системы позиционирования (GPS). Эти смещения отражают геодинамические процессы и связаны с тектоническими движениями [1]. Поэтому пространственно-временные поля деформаций земной поверхности используются как для изучения блочных моделей земной коры, так и в исследованиях, связанных с прогнозом землетрясений [2, 3].

В статьях [4, 5, 6, 7] было показано, что перед сильными землетрясениями смещения земной поверхности приводят к заметным изменениям как сжатия/растяжения, так и поворота блоков; величины таких деформаций рассчитывались стандартным образом для центров треугольников, смещения вершин которого заданы тремя ближайшими станциями GPS. В ряде более поздних работ для изучения эффективности прогнозов землетрясений на основе данных

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН частично за счет гранта РФФИ 20-07-00445.

GPS применялись методы искусственного интеллекта [8, 9, 10, 11]. В [9] временные ряды горизонтальных и вертикальных смещений станций GPS использовались для прогнозирования 15 сильных землетрясений, произошедших на западе Северной Америки в 2007–2016 гг.

В [12, 13] показана эффективность использования комплекса полей деформаций поверхности Земли для прогноза сильных землетрясений Калифорнии и Японии. В данной статье мы представляем для этих же регионов результаты исследования предвестников сильных землетрясений, относящихся к отдельным пространственно-временным сеточным полям, вычисленным по данным приёмных станций GPS.

2. МЕТОД

Исследования статистической связи сеймотектонических и геодинамических процессов с землетрясениями, ведутся десятки лет [14, 15, 16, 17]. Для установления характера связи мы анализируем свойства этих процессов, представленные в виде пространственно-временных сеточных полей. Мы будем считать, что связь исследуемого свойства с наступлением землетрясений существует, если перед сильными землетрясениями в окрестности их эпицентров значения соответствующего поля в большинстве случаев принимают аномальные значения, а в местах, где сильные землетрясения не ожидаются, подобные значения наблюдаются много реже. Мы предполагаем, что аномальными значениями могут быть величины, близкие к минимальным или максимальным значениям исследуемого поля [18].

Эффективность поля, которое используется для прогноза, зависит от методов обработки исходных данных, от применяемого метода прогноза землетрясений и от конкретных регионов исследования. Данная работа продолжает исследование [13]. Обработка исходных данных состоит в преобразовании временных рядов смещений приёмных станций GPS в сеточные пространственно-временные поля деформаций. Прогноз землетрясений выполняется с помощью метода минимального объёма тревоги [13, 18, 19].

Итак, пусть исследуемое свойство процесса представлено в виде пространственно-временного сеточного поля $\mathbf{F}$. Будем оценивать связь поля $\mathbf{F}$ с землетрясениями с магнитудами $m \in (M_1, M_2)$ по результатам того, насколько успешно поле $\mathbf{F}$ прогнозирует эпицентры целевых землетрясений. Прогноз даётся регулярно с шагом Δt . На каждом шаге алгоритм обучается и к моменту каждого нового прогноза t^* вычисляет прогнозирующую функцию от всех используемых для прогноза данных. Временной срез прогнозирующей функции в момент t^* определяет карту значений прогноза для интервала $[t^*, t^* + \Delta t)$. Значения прогнозирующей функции, превышающие некоторый порог V_0 , определяют зону тревоги. Землетрясение предсказано, если на интервале $[t^*, t^* + \Delta t)$ его эпицентр попадает в эту зону тревоги. Качество прогноза в момент t будем определять двумя величинами. Ими являются оценка вероятности обнаружения эпицентров сильных землетрясений U , и объём тревоги V . Вероятность обнаружения будем оценивать, как долю числа обнаруженных при заданном значении порога V_0 целевых событий Q^* , от числа всех целевых событий Q

$$U = Q^*/Q \quad (1)$$

Объём тревоги равен доле средней величины площади зоны тревоги S_{cp} от площади зоны анализа S

$$V = S_{cp}/S, S_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^N S_n}{N}, \quad (2)$$

где N — число интервалов прогноза за время от начала обучения до момента t .

Метод минимальной области тревоги обнаруживает близкое к максимальному числу эпицентров целевых землетрясений при заданном значении порога объема тревоги.

Легко показать, что значение объема тревоги равно вероятности обнаружения целевых событий по случайным полям признаков. Очевидно, чем больше средний размер площади зоны тревоги S_{cp} , тем больше вероятность обнаружения целевых событий случайным полем и тем меньше оценка вероятности обнаружения событий, вычисленная в результате обучения, отличается от величины V . Поэтому, площадь S_{cp} следует ограничивать.

При принятии решения по обнаружению целевых событий возникают два типа ошибок: пропуск целевых событий с вероятностью $(1 - U)$ и излишний размер зоны тревоги. Поскольку объем тревоги V равен вероятности случайного прогноза, то величина V ассоциируется с оценкой вероятности ложной тревоги V . Оценки U и V определяют качество не отдельного прогноза, а серии прогнозов. Эти оценки характеризуют прогностические свойства алгоритма, позволяют проводить сравнение алгоритмов прогноза землетрясений и исследовать эффективность прогноза по отдельным полям признаков и по их комбинациям. График зависимости $U(V)$ практически совпадает с классической ROC кривой [20, 21].

Таким образом, мерой связи поля $\mathbf{F}$ (или с комплекса полей $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_I$) с ожидаемым землетрясением с целевой магнитудой будем считать оценку вероятности обнаружения U землетрясений с целевыми магнитудами при заданной величине объема тревоги V_0 . При этом известно, что предвестник землетрясения с координатами эпицентра (x, y, t) находится в цилиндре с центром основания в точке (x, y, t) , радиусом R и образующей $[t - T, t)$.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Известно, что точность измерений GPS для вертикальных составляющих координат в 2–4 раза меньше, чем для горизонтальных [22, 23]. Поэтому в данной статье мы исследовали связь только для горизонтальных составляющих скоростей смещений. Здесь мы основывались на [24], где было показано, что поле горизонтальных скоростей смещений земной поверхности достаточно хорошо отражает характер движения блоков земной коры.

3.1. Исходные данные

Для исследований выбраны регионы Японии и Калифорнии, кардинально различающиеся по сейсмотектонике и геодинамике. Оба района располагаются на границах плит, но Япония отвечает области островной дуги, а Калифорния сдвиговой границе плит. Регион Японии анализировался в границах 130° – 145.5° в.д., 30° – 43° с.ш., а регион Калифорнии анализировался в границах -125° – -114° в.д., 32° – 43° с.ш. Прогнозировались землетрясения с глубинами гипоцентров $H \leq 60$ км и с магнитудами $m \geq 6.0$ для Японии и $m \geq 5.5$ для Калифорнии. Зона анализа определялась как территория, для которой расстояние от любой точки до станций мониторинга смещений поверхности земли по данным GPS не превышает 50 км.

Мы анализировали временные ряды суточных горизонтальных смещений поверхности земли в направлениях З-В и С-Ю на интервалах 01.01.2009–01.08.2022 для Японии и 01.01.2008–30.01.2022 для Калифорнии. Данные получены от Геодезической лаборатории Невады (NGL) [25]. Области анализа Японии и Калифорнии содержат 1229 и 1204 станций соответственно. Средние минимальные расстояния между приёмными станциями GPS составляют 12,8 км для Японии и 9,38 для Калифорнии, стандартные отклонения этих значений составляют 5,4 и 5,74 км. Сейсмологические данные Японии и Калифорнии представлены землетрясениями с магнитудами $m \geq 2.0$, с глубинами гипоцентров $H \leq 160$ км, взятыми из каталогов землетрясений Japan Meteorological Agency [26, 27] и National Earthquake Information Center (NEIC) [28] на интервалах 02.06.2002–01.08.2022 и 01.01.1995–30.07.2022 соответственно.

3.2. Вычисление полей

Моделирование выполняется с помощью ГИС ГеоТайм 3 [18, 29] по методике, описанной в [13]. Вычисление полей признаков прогноза землетрясений производится в 2 этапа. Целью первого этапа является выделение полезного сигнала из временных рядов координат приемных станций. Целью второго этапа является вычисление пространственно-временных полей признаков прогноза. На первом этапе выполняются 2 операции: (1) оценивание временных рядов скоростей деформаций и (2) вычисление пространственно-временных сеточных полей скоростей деформаций с положительными значениями в направлениях З-В и Ю-С.

Среднесуточные горизонтальные скорости смещений приёмной станции GPS $g_x(t)$ и $g_y(t)$ мы определяем по двум координатам, разнесенным во времени на величину интервала $T_0 = 30$ дней: $g_x(t) = (x(t) - x(t - T_0))/T_0$, $g_y(t) = (y(t) - y(t - T_0))/T_0$. Во временных рядах координат станций имеются разрывы. Поскольку оценки скорости смещения опережают время значения первых координат станции $x(t - T_0)$ и $y(t - T_0)$ на T_0 суток, то каждый разрыв в временных рядах координат станций увеличивает число пропущенных значений в временных рядах скоростей на T_0 суток. При большом числе разрывов число пропущенных значений скорости может значительно превышать число пропущенных значений координат. Чтобы ограничить число пропусков значений скорости, мы линейно интерполируем значения координат на пропусках, меньших или равных T_0 . При разрывах с пропусками более T_0 суток мы заканчиваем вычисление скорости на последнем значении координаты станции до начала разрыва и вновь оцениваем скорости, начиная с первого значения координаты станции после разрыва.

Пространственно-временные сеточные поля суточных скоростей деформаций V_x и V_y вычисляются для анализируемых регионов в сетке $\Delta x \times \Delta y \times \Delta t = 0.1^\circ \times 0.075^\circ \times 1$ суток. Вычисление полей выполнено в 2 шага. На первом шаге используется метод интерполяции, известный как метод обратных взвешенных расстояний. При интерполяции пропуски значений временных рядов суточных скоростей не заполняются, а учитываются как отсутствие станции мониторинга. Значения полей в узлах сетки для каждого временного среза поля компоненты скоростей З-В вычисляются по формуле:

$$V_{xn}(t) = \frac{\sum_{k=1}^K \frac{g_{xk}(t)}{(r_k)^p}}{\sum_{k=1}^K \frac{1}{(r_k)^p}}, \quad (3)$$

где $V_{xn}(t)$ — значение поля компоненты скорости З-В в узле сетки n в момент t , K — максимальное количество ближайших к узлу n станций $k = 1, 2, \dots, K$ в круге радиуса R_{max} , $g_{xk}(t)$ — значение компоненты скорости З-В для k -й приемной станции, $k = 1, 2, \dots, K$, в момент времени t , $r_k \leq R_{max}$ — расстояние от k -ой станции до узла сетки n , p — степень, определяющая зависимость веса станции от ее расстояния до узла сетки. Параметрами интерполяции являются $K = 5$, $R_{max} = 50$ км, $p = 1$. Если $r_k = 0$, то $V_{xn}(t) = g_{xk}(t)$. Вторая компонента поля вычисляется аналогично. После интерполяции поля скоростей V_x и V_y экспоненциально сглаживались симметрично по пространству с радиусом 15 км и обратно по времени с интервалом 30 суток.

Связь деформаций поверхности Земли по данным GPS с ожидаемыми целевыми землетрясениями анализировалась для пространственно-временных полей, представляющих инварианты скоростей деформаций, и полей, представляющих изменения этих инвариантов во времени.

F_1 — поле дивергенции скоростей деформации. Значение поля в точке с координатами (x, y) определяет относительные сокращения или расширения размеров малой горизонтальной площадки, расположенной в этой точке,

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y}, \quad (4)$$

F_2 — поле ротора скоростей деформации. Значение поля в точке с координатами (x, y) определяет направление и интенсивность скручивания поля вокруг вертикальной оси, расположенной в этой точке

$$\operatorname{rot} V = \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y}, \quad (5)$$

Положительное значение ротора соответствует вращению против часовой стрелки.

F_3 — поле скорости сдвиговых деформаций. Значение поля в точке с координатами (x, y) определяется выражением

$$\operatorname{sh} V = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2}, \quad (6)$$

Мы предполагаем, что сильным землетрясениям могут предшествовать не только аномальные изменения величин инвариантов, но и величин изменений деформационного режима во времени. Значения этих полей равны отношению средних значений инвариантов деформации на двух последовательных временных интервалах к среднеквадратичному отклонению этой разности. Значения полей вычисляются в 2 шага: сначала вычисляются поля изменений инвариантов деформации во времени с шагом во времени $\Delta t = 1$ сутки, затем поля и преобразуются к сетке $\Delta x \times \Delta y \times \Delta t = 0.1^\circ \times 0.075^\circ \times 30$ суток.

Поле F_4 определяет изменение дивергенции во времени. Значение поля $f_{4g}(t)$ в узле координатной сетки g равно отношению разности средних значений дивергенции в этом узле сетки $(\overline{\operatorname{div}_{2g}} - \overline{\operatorname{div}_{1g}})$ на двух последовательных интервалах времени T_1 и T_2 к стандартному отклонению этой разности $\sigma_g(\operatorname{div})$,

$$f_{4g}(t) = (\overline{\operatorname{div}_{2g}} - \overline{\operatorname{div}_{1g}}) / \sigma_g(\operatorname{div}), \quad (7)$$

Где: $\overline{\operatorname{div}_{2g}}$ вычисляется по значениям поля F_1 на интервале $(t - T_2, t)$, а $\overline{\operatorname{div}_{1g}}$ вычисляются на интервале $(t - T_2 - T_1, t - T_2)$.

Поле F_5 определяет изменение ротора во времени. Значения поля $f_{5g}(t)$ вычисляются по значениям поля F_2 аналогично значениям поля F_4 ,

$$f_{5g}(t) = (\overline{\operatorname{rot}_{2g}} - \overline{\operatorname{rot}_{1g}}) / \sigma_g(\operatorname{rot}), \quad (8)$$

Поле F_6 определяет изменение сдвига во времени. Значения поля $f_{6g}(t)$ вычисляются аналогичным образом по значениям поля F_3 ,

$$f_{6g}(t) = (\overline{\operatorname{sh}_{2g}} - \overline{\operatorname{sh}_{1g}}) / \sigma_g(\operatorname{sh}), \quad (9)$$

3.3. Анализ

Операции обработки временных рядов GPS используют ряд параметров: временной интервал оценивания среднесуточных скоростей смещений, параметры интерполяции временных рядов в пространственно-временные поля скоростей, размеры пространственных и временных окон сглаживания. Параметры преобразований выбирались, как и в [13], на основе качественных соображений по оптимальной очистке сигналов от шумов, способах восстановления

пропущенных исходных значений, методах выявления информации о пространственных и временных свойствах геодинамических процессов.

Параметры исследуемых пространственно-временных полей F_4 , F_5 и F_6 и параметры используемых в алгоритме метода минимального объема тревоги цилиндров предвестника подбирались нами на интервале обучения до начала тестирования для Японии по 38 землетрясениям с магнитудами $m \geq 6.0$ на интервале 02.02.2011–18.06.2016 и для Калифорнии по 7 землетрясениям с магнитудами $m \geq 5.5$ на интервале 07.08.2009–02.02.2016.

Анализ эффективности предвестников землетрясений выполнялся для каждого из полей F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 и F_6 в отдельности. Поле считается эффективным, если при объеме тревоги не более V_0 вероятность обнаружения целевых событий U на интервале тестирования статистически значимо отличается от вероятности обнаружения при прогнозе по полю, состоящему из случайных чисел. Лучшие результаты прогноза землетрясений получены по пространственно-временным полям увеличения во времени инвариантов деформаций F_4 , F_5 и F_6 с параметрами $T_1 = 630$ суток и $T_2 = 90$ суток для Японии и $T_1 = T_2 = 360$ суток для Калифорнии. Поля инвариантов деформаций F_1 , F_2 и F_3 , а также поля уменьшения во времени инвариантов деформаций F_4 , F_5 и F_6 с этими же параметрами показали вероятность обнаружения целевых событий U от 0.15 до 0.31. При пороговой величине объема тревоги $V_0 = 0.2$ эти значения практически не отличаются от вероятности обнаружения событий по случайному полю. Параметры цилиндров предвестника для Японии равны: радиус основания цилиндра $R = 8$ км, образующая цилиндра $T = 30$ суток, для Калифорнии $R = 16$ км и $T = 30$ суток. Эти параметры определяют окрестности, в которых в нашем эксперименте находятся предвестники Японских и Калифорнийских землетрясений. Учитывая малый временной интервал, в котором находится предвестник землетрясения, можно предположить, что скорее всего эти предвестники связаны с завершающей стадией процесса подготовки землетрясения. Согласно результатам анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения [30, 31], амплитуды аномалий сильно нарастают к моменту обобщенного землетрясения. Можно предположить, что выявляемые здесь аномалии отвечают более позднему и более выраженному этапу этого процесса.

Значения параметров, выделяемые нами в качестве предвестников землетрясений, не являются уникальными для исследуемых полей. Такие же и более аномальные значения могут наблюдаться и в областях, не относящихся к эпицентрам целевых землетрясений. Эти зоны представляют ошибки прогноза, являясь ошибками ложной тревоги. Они ограничены размером объема тревоги V_0 и занимают в среднем не более до 20% от зоны анализа.

Япония

Для Японии исследовались предвестники землетрясений с магнитудами $m \geq 6.0$. Обучение проводилось на интервале от 02.02.2011 до момента очередного тестирования. Тестирование проводилось на интервале от 18.06.2016 до 02.08.2022. Это до некоторой степени позволяет при тестировании избежать влияния на прогноз сильнейшего землетрясения Тохоку 11.03.2011. Параметры алгоритма обучения: радиус основания цилиндра предвестника $R = 8$ км, интервал $T = 30$ суток.

На Рис. 1 на фоне карты цифровой модели рельефа показаны зона анализа Японского региона и эпицентры целевых землетрясений с магнитудами $m \geq 6.0$ на интервале 20.10.2004–02.08.2022. В таблице 1 показаны координаты эпицентров тестовых землетрясений и результаты прогноза по полям F_4 , F_5 и F_6 . Прогнозная карта принимает значения объема тревоги от 0 до 1. Каждое значение карты соответствует объему тревоги, равному доле площади тревоги от площади зоны анализа. В последних трех столбцах таблицы 1 показаны значения объема тревоги в эпицентрах тестовых землетрясений. Значения объемов тревоги не более 0.2 выде-

лены жирным шрифтом. Эти землетрясения успешно обнаружены с объёмом тревоги не более $V = 0.2$.

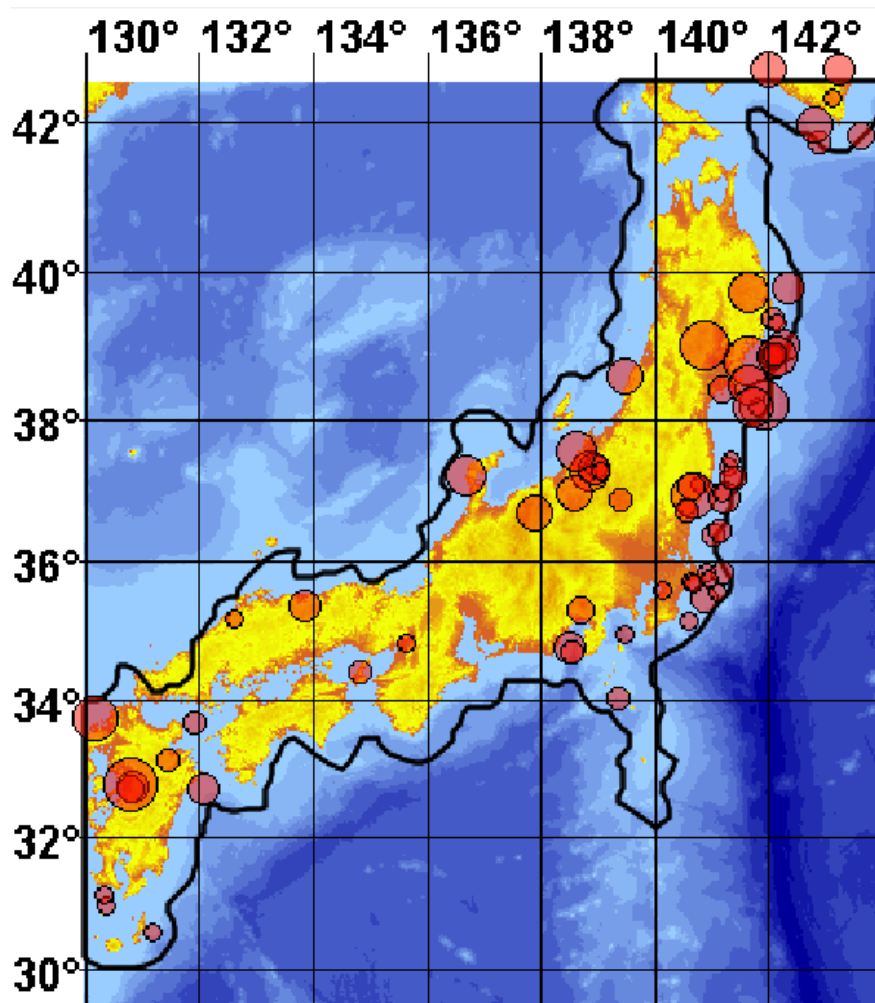


Рис. 1. Зона анализа Японии и эпицентры землетрясений с магнитудами $m \geq 6.0$, на интервале 20.10.2004–02.08.2022.

Таблицу 1 можно дополнить представленными на Рис. 2 гистограммами значений анализируемых полей и предвестников землетрясений на интервале тестирования 18.06.2016–02.08.2022. На Рисунке красным цветом показаны гистограммы значений пространственно-временных полей изменения деформаций дивергенции F_4 , ротора F_5 и сдвига F_6 . Синим цветом показаны гистограммы значений этих же полей, которые являются предвестниками 13 тестовых землетрясений. Предвестниками являются значения в узлах сетки поля, которые предшествуют прогнозируемым землетрясениям на интервалах $T = 30$ суток и относятся к цилиндрам с центрами основания в эпицентрах землетрясений и с радиусом основания $R = 8$ км. Можно видеть, что лучшее разделение гистограмм относится к полю F_4 . Поля F_5 и F_6 не являются эффективными для прогноза.

На Рис. 3 показаны зависимости оценки вероятности обнаружения целевых событий U от объёма тревоги V . Можно видеть, что для региона Японии поле увеличения дивергенции скорости деформаций F_4 значительно лучше обнаруживает целевые события, чем поля увеличения ротора F_5 и деформации сдвига F_6 .

Таблица 1. Результаты прогноза целевых землетрясений Японии по пространственно-временным полям увеличения во времени инвариантов деформаций F_4 , F_5 и F_6 .

№	Время	Долгота	Широта	Глубина гипоцентра, км	Магнитуда m	Объём тревоги при прогнозе		
						Поле F_4	Поле F_5	Поле F_6
1	2016/10/18	133.856	35.380	10.6	6.6	9.44	62.03	13.39
2	2016/11/21	141.346	37.175	23.8	6.2	13.45	14.60	89.75
3	2016/12/26	140.574	36.720	10.8	6.3	40.56	19.55	16.10
4	2018/04/06	132.587	35.185	12.1	6.1	16.67	60.67	90.26
5	2018/06/15	135.622	34.844	13.0	6.1	93.14	8.29	15.76
6	2018/07/05	140.592	35.165	56.8	6.0	31.03	35.37	80.27
7	2019/01/06	131.165	30.573	30.1	6.0	18.99	61.34	30.31
8	2019/06/16	139.479	38.608	14.0	6.7	31.29	16.91	48.97
9	2020/04/17	142.09900	38.88800	46.1	6.2	11.36	16.06	49.73
10	2020/06/22	141.11300	35.55300	36.1	6.1	5.81	32.67	49.24
11	2021/03/18	141.62800	38.46800	59.5	6.9	5.86	82.68	15.16
12	2021/04/28	141.74000	38.17400	51.4	6.8	5.88	93.65	32.67
13	2022/01/19	132.07200	32.71600	44.6	6.6	25.85	35.62	9.78

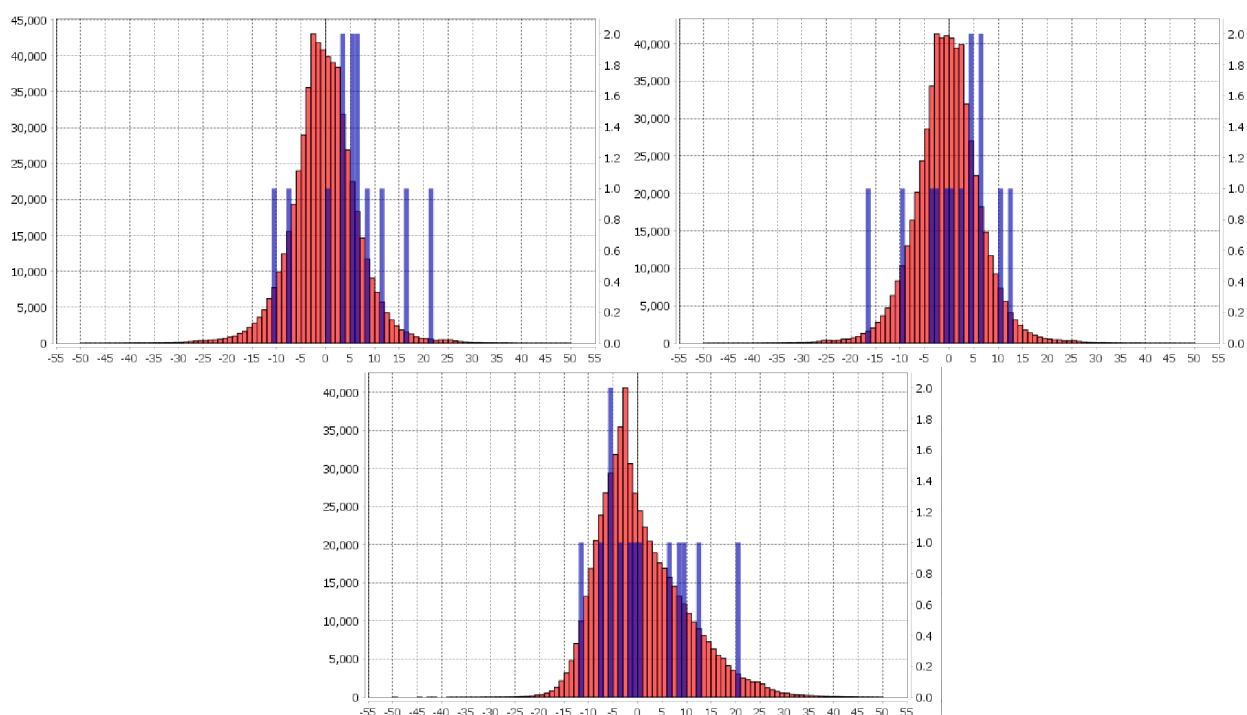


Рис. 2. Япония: гистограммы значений полей F_4 , F_5 и F_6 (красный цвет) и предвестников землетрясений (синий цвет) на интервале тестирования 18.06.2016–02.08.2022.

Калифорния

Для Калифорнии исследовались предвестники землетрясений с магнитудами $m \geq 5.5$. Обучение проводилось на интервале от 07.08.2009 до момента очередного тестирования. Тестирование проводилось на интервале от 02.02.2016 до 30.07.2022. На Рис. 4 на фоне карты цифровой

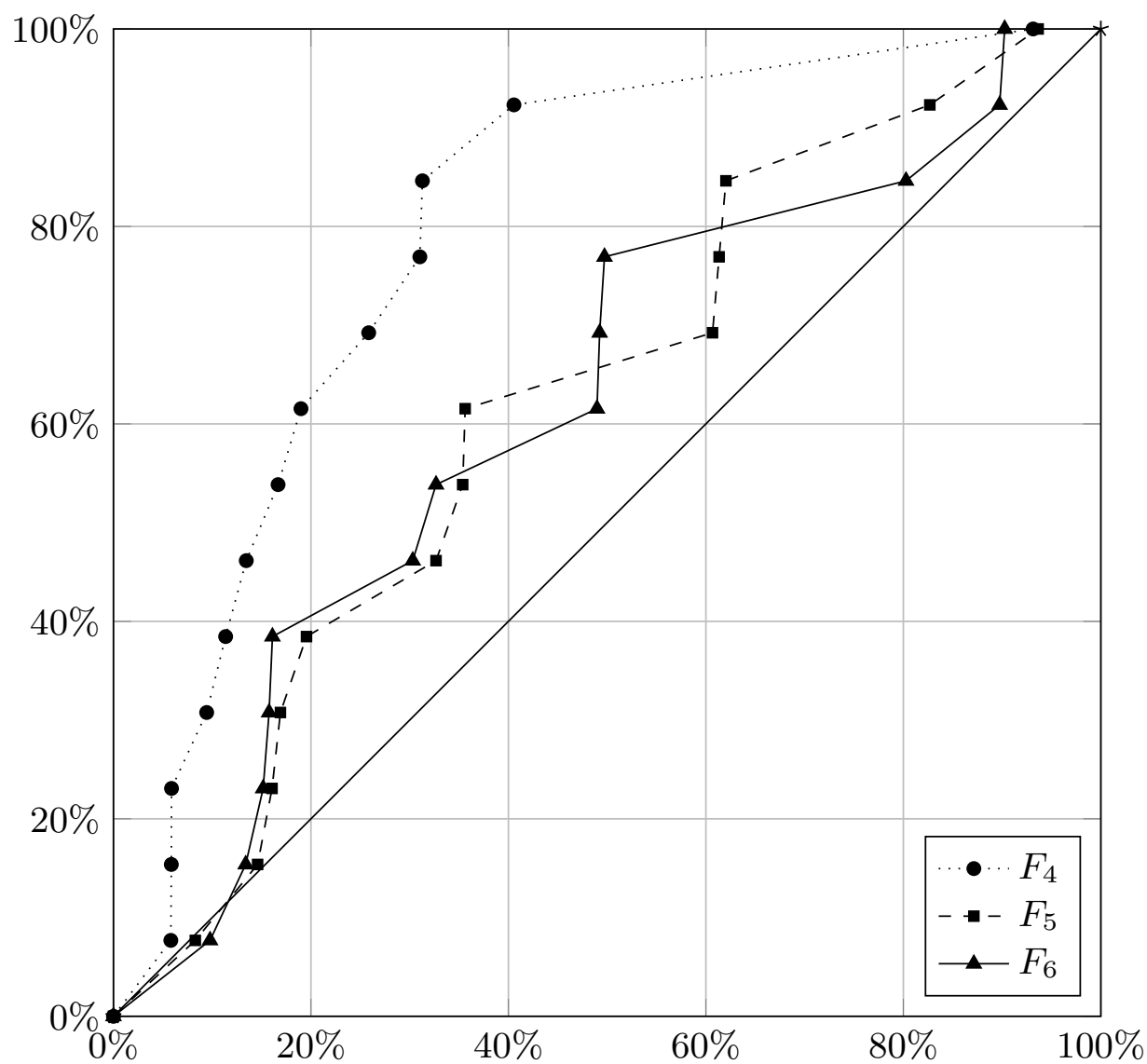


Рис. 3. Графики зависимостей $U(V)$ при прогнозе по положительным значениям полей изменения дивергенции деформаций F_4 , ротора F_5 и сдвига F_6 для Японии.

модели рельефа показана зона анализа и эпицентры целевых землетрясений с магнитудами $m \geq 5.5$, на интервале 18.01.2001–12.08.2022. Таблица 2 показывает результаты тестирования. Она аналогична таблице 1.

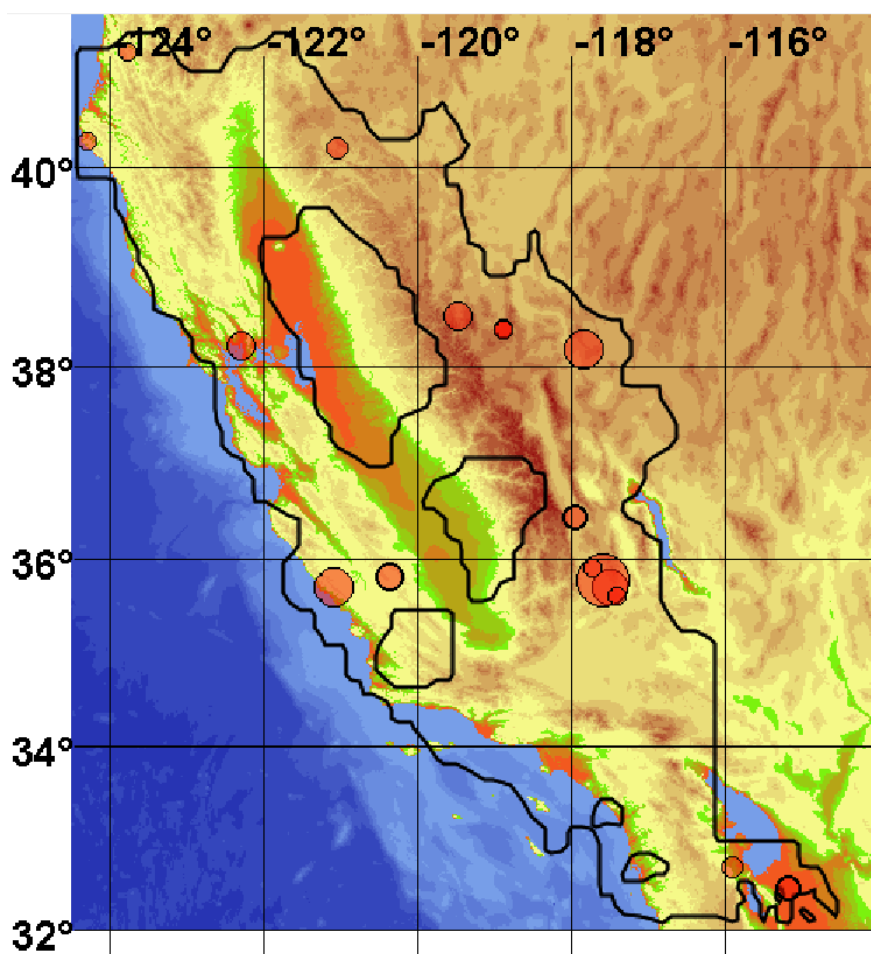


Рис. 4. Зона анализа Калифорнии и эпицентры землетрясений с магнитудами $m \geq 5.5$, на интервале 18.01.2001–12.08.2022.

На Рис. 5 показаны гистограммы значений анализируемых полей и предвестников землетрясений на интервале тестирования 02.02.2016–30.07.2022. На рисунке красным цветом показаны гистограммы значений пространственно-временных полей изменения деформаций дивергенции F_4 , ротора F_5 и сдвига F_6 . Синим цветом показаны гистограммы значений этих же полей, которые являются предвестниками 11 тестовых землетрясений. Предвестниками являются значения в узлах сетки поля, которые предшествуют прогнозируемым землетрясениям на интервалах $T = 30$ суток и относятся к цилиндрам с центрами основания в эпицентрах землетрясений и с радиусом основания $R = 16$ км. Можно видеть, что хорошее разделение гистограмм относится ко всем полям F_4 , F_5 и F_6 .

На Рис. 6 показаны зависимости оценки вероятности обнаружения целевых событий U от объёма тревоги V . Можно видеть, что эффективность прогноза землетрясений по полям изменения дивергенции скорости деформаций F_4 , изменения ротора F_5 и сдвига F_6 почти одинакова.

Таблица 2. Результаты прогноза целевых землетрясений Калифорнии по пространственно-временным полям увеличения во времени инвариантов деформаций F_4 , F_5 и F_6 .

№	Время	Долгота	Широта	Глубина гипоцентра, км	Магни- туда m	Объём тревоги при прогнозе		
						Поле F_4	Поле F_5	Поле F_6
1	2016/12/19	-118.8989	38.37550	11.3	5.6	6.56	11.49	7.93
2	2016/12/19	-118.8972	38.39040	12.2	5.6	6.56	11.49	7.93
3	2016/12/19	-118.8957	38.37770	8.8	5.5	6.56	11.49	7.93
4	2019/06/14	-124.3003	40.27350	9.44	5.6	100.0	78.19	75.30
5	2019/06/25	-117.5038	35.70533	10.5	6.4	6.64	11.65	8.63
6	2019/06/27	-117.5993	35.76950	8.0	7.1	6.64	11.65	8.63
7	2019/06/27	-117.7495	35.90117	5.04	5.5	3.66	3.84	8.63
8	2020/05/06	-117.8497	38.16890	2.7	6.5	1.83	3.87	1.49
9	2020/05/25	-117.4281	35.61483	8.44	5.5	52.09	59.64	44.36
10	2020/06/15	-117.9751	36.44683	4.66	5.8	3.65	3.85	7.06
11	2021/06/29	-119.4998	38.50750	7.45	6.0	32.97	61.30	38.21

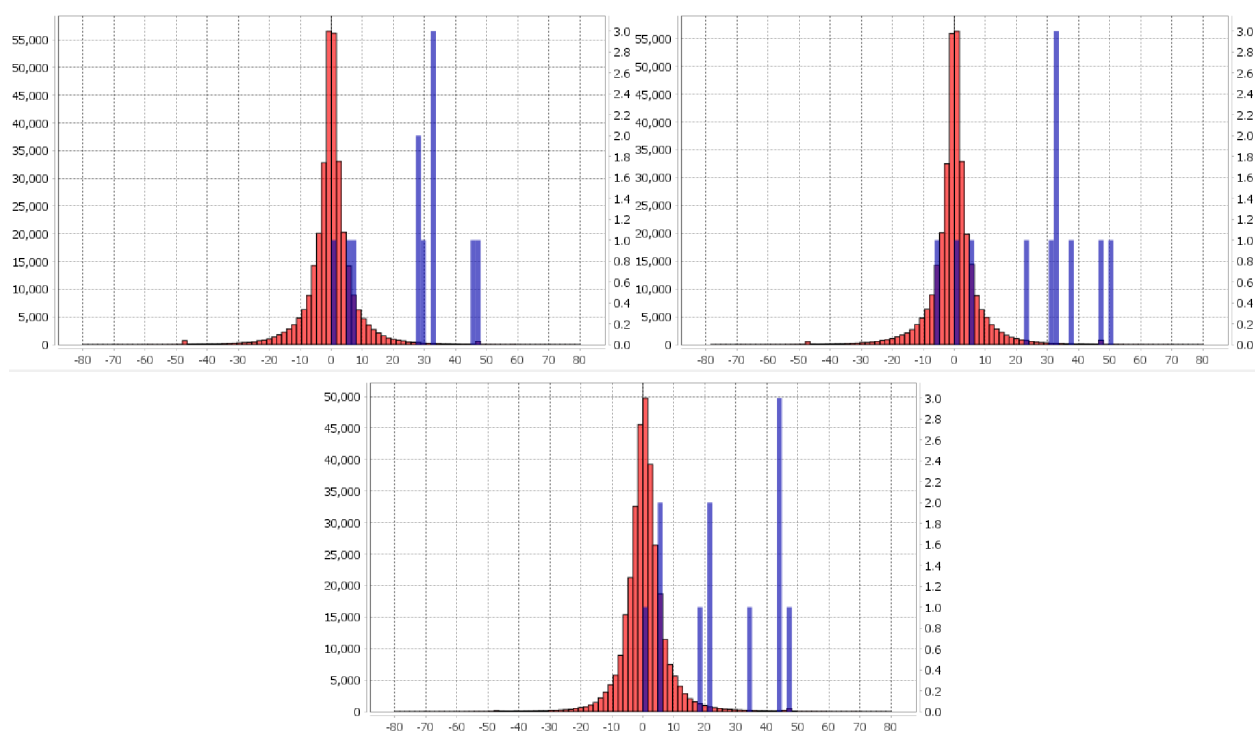


Рис. 5. Калифорния: гистограммы значений полей F_4 , F_5 и F_6 (красный цвет) и предвестников землетрясений (синий цвет) на интервале тестирования 02.02.2016–30.07.2022.

Можно видеть, что, в отличие от региона Японии, поля изменения дивергенции скорости деформаций F_4 , изменения ротора F_5 и сдвига F_6 дают близкие по качеству значения прогноза. При этом эффективность прогноза по этим полям для Калифорнии заметно лучше.

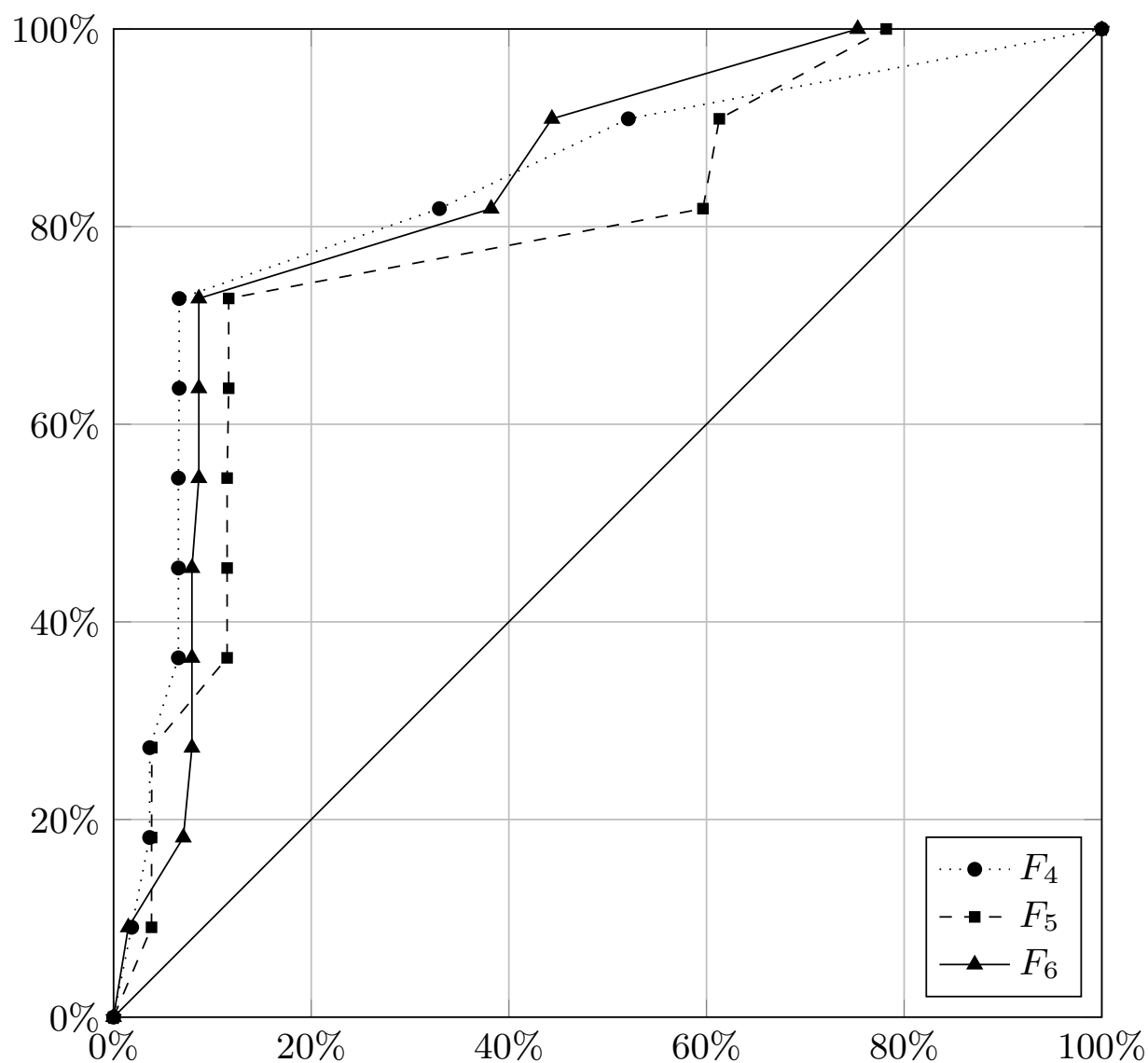


Рис. 6. Графики зависимостей $U(V)$ при прогнозе по положительным значениям полей изменения дивергенции деформаций F_4 , ротора F_5 и сдвига F_6 для Калифорнии.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Связь смещений поверхности Земли по данным GPS станций с подготовкой очага сильного землетрясения мы оцениваем по эффективности прогноза землетрясений в Японии и Калифорнии по пространственно-временным полям F_4 , F_5 и F_6 . Предвестник является эффективным для прогноза, если перед сильными землетрясениями в окрестности их эпицентров значения поля этого предвестника в большинстве случаев принимают аномальные значения, а в местах, где сильные землетрясения не ожидаются, подобные значения наблюдаются много реже. Для оценки эффективности прогноза землетрясений используем статистическую модель проверки гипотез. Для этого можно сравнить результаты прогноза целевых землетрясений по данным GPS с результатами прогноза по случайному полю. Прогнозы по пространственно-временным полям F_1 , F_2 и F_3 и по отрицательным значениям F_4 , F_5 и F_6 (что отвечает относительно пониженным скоростям деформации) и по малым значениям скоростей деформаций не дали значимого результата, статистически заведомо отличающегося от случайного угадывания. Прогноз по большим значениям положительных отклонениям F_4 , F_5 и F_6 (Табл. 1 и 2) дал результат заведомо статистически отличный от случайного угадывания. Заметим, что аномальные значения этих полей F_4 , F_5 и F_6 не связаны с собственно величинами деформаций. Аномальные изменения дивергенции могут относиться к процессам резкого уменьшения деформаций растяжения, перехода от деформаций растяжения к деформациям сжатия и резкого увеличения деформаций сжатия. Для поля изменения ротора аномальные изменения могут относиться к процессу, замедляющего скручивание по часовой стрелке, перехода от скручивания по часовой стрелке к скручиванию против часовой стрелки и ускорению скручивания против часовой стрелки. Для поля изменения сдвиговых деформаций аномальные значения интерпретируются как ускорения деформации сдвига.

Рассмотрим детальнее результаты, полученные по анализу полей F_4 , F_5 и F_6 . Из таблицы 1 видно, что в Японии целевые события можно считать независимыми. Тогда можно считать, что результаты прогноза подчиняются биномиальному распределению. Напомним, что вероятность прогноза по случайному полю равна объему тревоги. Следовательно, вероятность успешного прогноза по случайному полю равна пороговой величине объема тревоги $p = V = 0.2$. Из таблицы 1 мы видим, что объеме тревоги $V = 0.2$ по полю F_4 , алгоритм получил из $Q = 13$ прогнозов $Q^* = 8$ успешных прогнозов, а по полям F_5 и F_6 алгоритм получил по 5 успешных прогнозов. Следовательно, наблюдаемая частота успешного прогноза по полю F_4 равна $p = Q^*/Q = 8/13 = 0.615$, а по полям F_5 и F_6 $p = 5/13 = 0.38$, что во всех случаях существенно превышает вероятность $p = 0,2$ успешного прогноза для случайного поля. Возникает вопрос: можно ли объяснить наблюдаемое различие между этими значениями случайным характером выборки; нетрудно показать, что случайно такое отличие может реализоваться с вероятностью существенно менее 5%.

С точки зрения проверки гипотез это означает, что нулевая гипотеза $p = 0,2$ требует проверки правосторонней альтернативы $p > 0,2$. Взяв модель биномиального распределения с числом испытаний $Q = 13$ и вероятностью удачного события $p = 0,2$, мы нашли из таблиц биномиального распределения, что вероятность получения $Q^* = 8$ или более успешных предсказаний составляет 0,0012. Поскольку это значение значительно меньше общепринятого уровня значимости 0,05, то нулевая гипотеза для поля F_4 может быть отвергнута. Для полей F_5 и F_6 из таблиц биномиального распределения имеем, что вероятность получения $Q^* = 5$ или более успешных предсказаний составляет 0,0991. Это значение меньше уровня значимости 0,05. Следовательно, нулевая гипотеза о том, что данный результат получен случайно, может быть отвергнута.

Для Калифорнии из таблицы 2 можно видеть, что обнаруженные каждым из полей F_4 , F_5 и F_6 события с номерами 2 и 3 могут являться афтершоками события с номером 1. Бу-

дем учитывать эти три события, как одно событие с успешным прогнозом. Тогда получаем, что из $Q = 9$ оставшихся прогнозов $Q^* = 6$ являются успешными при вероятности прогноза случайным полем $p=0.2$. Из таблиц биномиального распределения следует, что вероятность получения $Q^* = 6$ или более успешных предсказаний составляет 0,0031. Это значение значительно меньше уровня значимости 0,05. Поэтому здесь нулевая гипотеза также отвергается.

Из проведенного анализа получаем, что сами по себе величины (инварианты) деформации не являются информативными прогнозными признаками. Таковыми являются скорости изменения инвариантов деформации, причем в плане аномального изменения скорости деформаций. Сравним теперь результаты, полученные для двух существенно различных в сеймотектоническом отношении регионов Японии и Калифорнии.

В целом эффективность прогноза, в плане выявления аномалии, по крайней мере по одному из полей F_4 , F_5 и F_6 для Японии и Калифорнии оказались близкими. Но в Калифорнии во всех спрогнозированных случаях сработали сразу все 3 эти характеристики. В Японии случаев аномалии по всем трем полям нет совсем, и в более половины случаев прогноз базируется на аномалии только одного поля, причем чаще это аномалия изменения поля скорости изменения дивергенции F_4 . Полученные результаты допускают следующую интерпретацию. Сейсмичность Калифорнии обусловлена неглубокими ($H < 20$ км) землетрясениями, четко приуроченными к известным по поверхностным данным сдвиговым зонам [32]. В этом случае большие значения деформации и скорости деформации с неизбежностью маркируют сдвиговые зоны, в окрестности которых, в сложном реальном поле тектонических деформаций реализуются и вращательные, и дилатансионные деформации. Отсюда не удивительно, что для прогноза в равной степени оказываются информативны все три поля изменения скоростей деформации.

Иная сеймотектоническая ситуация в Японии. Здесь землетрясения распространены во всем интервале глубин, причем в большинстве случаев землетрясения локализованы вне связи с известными приповерхностными разломными зонами. При этом сейсмичность может оказаться связанной с превращениями вещества как погружающихся плит, так и литосферы островодужного блока, и потому иметь более тесную связь со скоростями дилатансионных деформаций. Этим может объясняться то, что для Японии мы видим более тесную связь сейсмичности именно с дилатансионными процессами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ряд сейсмоактивных регионов оборудован достаточно плотными сетями приемных станций GPS, осуществляющих мониторинг смещений поверхности земли. В этой работе мы пытались экспериментально оценить эффективность предвестников землетрясений, вычисленных по данным космической геодезии для систематического прогноза землетрясений и дать этому предварительную геофизическую интерпретацию. Очевидно, что результаты зависят от сети наблюдений, точности GPS измерений, от метода обработки GPS данных и от метода прогноза землетрясений.

Результаты статьи получены по данным, относящимся к регионам Японии и Калифорнии. Данные космической геодезии представлены среднесуточными временными рядами горизонтальных смещений поверхности земли. Центральное место в обработке рядов GPS относится к вычислению пространственно-временных полей изменения инвариантов скорости сейсмических деформаций. Для прогноза землетрясений мы использовали разработанный нами метод машинного обучения: метод минимальной области тревоги.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Предвестники землетрясений найдены в пространственно-временных полях увеличения скорости дивергенции деформаций для Японии и в полях увеличения скорости дивергенции, ро-

тора и сдвига деформаций для Калифорнии. Эти предвестники землетрясений наблюдаются на интервале 30 суток до землетрясений на расстоянии от эпицентров землетрясений до 16 км для Калифорнии и до 8 км для Японии, что близко к оценкам средних размеров очага землетрясения М6 по данным [33, 34].

Результат прогноза по Калифорнии показывает, что перед сильными землетрясениями процессы изменения скоростей всех трех типов деформаций согласованы в пространстве и во времени. Для Японии такая согласованность не наблюдается, наибольшую информативность для Японии имеет дилатансионная (объемная) компонента скорости деформации.

Показана статистическая значимость эффективности использования пространственно-временных полей изменения инвариантов скорости деформаций в качестве предвестников землетрясений.

Следует учесть, что приведенные выводы получены при моделировании прогноза землетрясений на ограниченном материале. Поэтому полученные результаты требуют проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiyoo M. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq Res Inst*, 1958, vol.36, pp.99–134.
2. Pepe A., Calo F. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. *Applied Sciences*, 2017, vol.17, no.12, p.1264.
3. Alvan, Habibeh Valizadeh Overview of remote sensing techniques in earthquake prediction. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2011.
4. Murai S., Araki H. A new method on GPS network triangles-prediction of earthquake using GPS. *GIM International*, 2003.
5. Murai, Shunji, and Harumi Araki Prediction of earthquake and volcanic eruption using GPS. *Asian Journal of Geoinformatics*, 2004, vol.4, no.3, p.85–90.
6. Murai S. Can we predict earthquakes with GPS data? *International Journal of Digital Earth*, 2010, vol.3, no.1, pp.83–90.
7. Borghi, Alessandra, et al. GPS monitoring and earthquake prediction: a success story towards a useful integration. *Tectonophysics*, 2009, vol.465, no.1-4, pp.177–189.
8. Klein, Emilie, et al. A comprehensive analysis of the Illapel 2015 Mw8. 3 earthquake from GPS and InSAR data. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol.469, pp.123–134.
9. Liu, Yanyan, et al. Combining GPS+ GLONASS observations to improve the fixing percentage and precision of long baselines with limited data. *Advances in space research*, 2016, vol.57, no.5, pp.1258–1267.
10. Wang, Qianlong, et al. Earthquake prediction based on spatio-temporal data mining: an LSTM network approach. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, vol.8, no.1, pp.148–158.
11. Chen, Chieh-Hung, et al. Unique pre-earthquake deformation patterns in the spatial domains from GPS in Taiwan. *Remote Sensing*, 2020, vol.12, no.3, p.366.
12. Gitis, Valeri, and Alexander Derendyaev Spatio-temporal analysis of earth's surface deformation by GPS and InSAR Data. *International Conference on Computational Science and Its Applications*, 2014, Springer, Cham, pp.237–251.
13. Gitis, Valeri, Alexander Derendyaev, and Konstantin Petrov Analyzing the Performance of GPS Data for Earthquake Prediction. *Remote Sensing*, 2021, Springer, Cham, p.1842.
14. Соболев, Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003
15. Cicerone, Robert D., John E. Ebel, and James Britton A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 2009, vol.476, no.3-4, pp.371–396.

16. Huang, Fuqiong, et al. Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years. *Geodesy and Geodynamics*, 2017, vol.8, no.1, pp.1–12.
17. Wu Y. Q., Jiang Z. S., Pang Y. J., and Chen C. Y. Statistical Correlation of Seismicity and Geodetic Strain Rate in the Chinese Mainland. *Seismological Society of America*, 2022, vol.93, no.1, pp.268–276.
18. Gitis, V. G., and A. B. Derendyaev Web-Based GIS platform for automatic prediction of earthquakes. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol.10962, pp.268–283.
19. Gitis, V. G., and A. B. Derendyaev The method of the minimum area of alarm for earthquake magnitude prediction. *Frontiers in Earth Science*, 2020, vol.11, doi:10.3389/feart.2020.585317.
20. Metz, Charles E. Basic principles of ROC analysis. *Seminars in nuclear medicine*, 1978, vol.8, no.4, pp.283–298.
21. Goncalves, Luzia, et al. ROC curve estimation: An overview. *REVSTAT-Statistical journal*, 2014, vol.12, no.1, pp.1–20.
22. Murray-Moraleda, J. GPS: Applications in crustal deformation monitoring. In *Extreme Environmental Events*, Meyers, R.A., Ed., 2011, pp.589–622.
23. Yuan, Linguo, et al. The tidal displacement field at Earth's surface determined using global GPS observations. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2013, vol.118, no.5, pp.2618–2632.
24. Kuzikov, S. I., and Sh A. Mukhamediev Structure of the present-day velocity field of the crust in the area of the Central-Asian GPS network. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2010, vol.46, no.7, pp.584–601.
25. Blewitt, Geoffrey, William C. Hammond, and Corne Kreemer Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 2018, vol.99, doi:10.1029/2018EO104623.
26. Okada, Yoshimitsu, et al. Recent progress of seismic observation networks in Japan Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net. *Earth, Planets and Space*, 2004, vol.56, no.8, pp.xv–xxviii.
27. Obara, Kazushige, et al. A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. *Review of scientific instruments*, 2005, vol.76, no.2, 021301.
28. Barnhart, William D., Gavin P. Hayes, and David J. Wald Global earthquake response with imaging geodesy: Recent examples from the USGS NEIC. *Remote Sensing*, 2019, vol.11, no.11, p.1357.
29. Gitis, V., Derendyaev, A., Metrikov, P., and Shogin, A. Network geoinformation technology for seismic hazard research. *Natural hazards*, 2012, vol.62, no.3, pp.1021–1036.
30. Rodkin, M. V., and I. N. Tikhonov The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2016, vol.95, no.3, pp.76–84.
31. Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация. *Вулканонология и сейсмология*, 2020, Т. 1, 64–76.
32. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016, 424 с.
33. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993, 314 с.
34. Wells, Donald L., and Kevin J. Coppersmith New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 1994, vol.84, no.4, pp.974–1002.

Studies on Earthquake Precursors Calculated from Space Geodesy Data

Valeri Gitis, Mikhail Rodkin, Alexander Derendyaev, Yanqiang Wu, Jingyang Zhao

A number of seismically active regions are equipped with sufficiently dense networks of GPS receiving stations that monitor the displacements of the earth's surface. The article discusses the experimental results and geophysical interpretation of the estimation of the effectiveness of earthquake precursors calculated from space geodesy data. A precursor is effective for forecasting if, before strong earthquakes, in the vicinity of their epicenters, the field values of this precursor in most cases take anomalous values, and in places where strong earthquakes are not expected, such values are observed much less frequently. The results of the article are based on data pertaining to the regions of Japan and California. Space geodesy data are average daily series of horizontal displacements of the earth's surface. The minimum alarm zone method was used to predict earthquakes. The statistical significance of the efficiency of using spatiotemporal fields of change in strain rate invariants as earthquake precursors is shown.

KEYWORDS: machine learning, geoinformation technologies, earthquake forecast, seismic hazard.