

УДК 550.34:681.3(521.16)

© Коллектив авторов

А.В. Михеева, А.П. Важенин, П.Г. Дядьков, А.Г. Марчук

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ВОКРУГ ПРЕФЕКТУРЫ ФУКУСИМА ИНСТРУМЕНТАМИ СИСТЕМЫ GIS-EEDB

Введение

В статье представлена модификация программной системы GIS-EEDB (Expert Earthquakes Database), названная «Fukushima-EEDB» и разработанная в целях исследования сейсмичности близ префектуры Фукусима (Япония), испытавшей на себе 11.03.2011 разрушительное воздействие «Великого Восточно-Японского землетрясения» с магнитудой $M_w = 9,0$. Данная версия системы впервые разработана на платформе Windows 8. Рассмотрены базовая логическая и функциональная структуры, а также результаты применения математических алгоритмов для визуализации сейсмичности и анализа сейсмического режима. В частности, алгоритмы анализа позволили рассчитать карты и диаграммы изменения параметров сейсмического процесса, таких как параметры графика повторяемости (A и b), концентрационный критерий, сейсмические активизации и затишья и т.д. Географическая и аналитическая программная среда обеспечили пространственное представление изменения сейсмических характеристик на картах и разрезах. Представлены примеры анализа сейсмического режима в области, окружающей префектуру Фукусима.

Научная программная система GIS-EEDB и ее модификация

Вычислительная интерактивная система EEDB была разработана авторами: А.В. Михеевой, П.Г. Дядьковым и А.Г. Марчуком [1] для проведения исследования по сейсмологическим данным. Поэтому ее можно рассматривать как автоматизированное рабочее место исследователя сейсмогеодинамического режима.

Логическая структура EEDB представляет собой совокупность взаимодействующих между собой программных блоков [1, 2]: сейсмологической базы данных, географической подсистемы и подсистемы анализа данных. Эти подсистемы можно обозначить на функциональной схеме последовательности исследовательских работ в среде EEDB (рис. 1).

Слово «экспертная» в названии системы отражает одну из ее основных особенностей – предоставление пользователю максимально полной информации и современных научных методик изучения для решения таких исследовательских задач, как обработка и визуализация данных, совершенствование способов наглядного представления результатов, введение в исследование новых характеристик, методик и подходов.

Существует ряд физических и математических положений, используемых при анализе сейсмичности, от эмпирических зависимостей, полученных в результате многолетних наблюдений за поведением сейсмичности (закон повторяемости или самоподобия [3], закон убывания интенсивности афтершоков [4] и т.д.), до аппарата математической статистики.

Разработанная геоинформационно-экспертная система GIS-EEDB экспертного математического анализа динамики сейсмических процессов позволяет воспользоваться перечисленными современными средствами на различных уровнях исследования – от глобального до локального.

В данной работе демонстрируются возможности системы GIS-EEDB для исследования сейсмичности близ префектуры Фукусима, включая «Великое Восточно-Японское землетрясение» (альтернативное название, принадлежащее агентству JMA, – «Землетрясение Тохоку 2011 близ Тихоокеанского побережья» или сокращенно – землетрясение Тохоку). Таким образом, мы определили область наших исследований рамками: 36-39°N; 138-146°E.

Адаптация и модификация системы GIS-EEDB к особенностям этой географической области включили в себя:

1. Создание для Фукусимы операционной сейсмологической Базы Данных. Адаптация программного инструментария для создания и конвертирования данных по землетрясениям близ Фукусимы в требуемый формат пакета «Fukushima-EEDB».



Рис. 1. Логико-функциональная структура и последовательность исследования сейсмичности в системе EEDB

2. Подготовка географической системы пакета «Fukushima-EEDB» для визуализации и анализа сейсмической информации префектуры Фукусима. Наполнение системы детальными географическими данными по префектуре, используя данные ASTER GDEM (для теневой модели рельефа, используемой в системе EEDB) и Natural Earth (для детализации слоев физической и культурной географии в векторном и точечном форматах).
3. Адаптация методов и алгоритмов статистической обработки сейсмологических данных к особенностям геодинамики региона. Применение комплексного геоинформационного подхода для изучения закономерностей и аномалий сейсмичности в условиях Японии.

Перечисленные подготовительные работы были выполнены в среде вспомогательных приложений, разработанных для пополнения ресурсов системы EEDB, а последующий анализ сейсмичности – в среде полученной таким образом системы «Fukushima-EEDB». При этом проведена адаптация среды разработки системы GIS-EEDB к платформе Windows 8, заключающаяся в переводе кодов основной программы и вспомогательных приложений в стандарты последних версий Visual Studio

и FireFox и освоении новых версий утилит Global Mapper и FireFox. В качестве сейсмологической базы был выбран каталог японского метеорологического агентства JMA, как наиболее полный на сегодняшний день. При выборе сравнивались следующие японские каталоги: JUNEC (1985/07/01 – 1998/12/31, Japan University Network Earthquake Catalog), NIED (1979/07/01 – 2003/06/30, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention Earthquake Catalog) и JMA (1926/01/01 – 2013/05/31, Japan Meteorological Agency Earthquake Catalog).

Особенности распределения сейсмичности, выявленные с помощью системы «Fukushima-EEDB»

Простая **визуализация** на карте (с **сортировкой** по магнитуде) и **выборка** (т.е. отсеивание мелких событий) позволяют выполнить сопоставление пространственного распределения сейсмичности относительно основных геологических структур территории близ префектуры Фукусима. Прежде всего это зона субдукции и ее элементы, такие, как глубоководный желоб, островная дуга и окраинное море. Есть также предположение [5], что данная область является зоной пересечения меридионального

Япономорского и диагонального Окраинно-морского трансрегиональных линейментов (черные вертикальные границы на рис. 2).

На более локальном уровне можно выявить следующие сейсмические структуры: полосовое распределение крупнейших событий последнего 10-летия (№1, рис. 2); зону отклика 200 км южнее (№3, рис. 2); внутриостровной пояс умеренной сейсмической активности в виде кольца (№2, рис. 2); зону повышенной сейсмической активности на глубинах от 50 до 100 км (№4, рис. 2), а также область сейсмической последовательности [6] в районе южной границы префектуры Фукусима (№5, рис. 2), включающей крупное землетрясение 11 апреля 2011 г. ($M_s = 7,0$). Это первичный, визуальный анализ выбранной сейсмичности, который дает пример использования процедур визуализации системы «Fukushima-EEDB».

Рассмотрим выявленное нами полосовое распределение вдоль 38-й параллели всех крупных ($M_s \geq 7$) событий последней декады, включая разрушительное землетрясение Тохоку (№1, рис. 2; рис. 3а). На тектоно-геоморфологической карте [7] все известные тектонические структуры региона имеют северо-восточное и северное простираение в соответствии с глобальными структурами. Но по отдельным особенностям: ступенчатому смещению линии эродированного антиклинального хребта и углообразному изгибу в направлениях главного Японского желоба и остальных параллельных ему

разломов (рис. 3а) можно предположить наличие вдоль 38 параллели древнего, неактивного в последнее время разлома, проявившего себя в последнее десятилетие в качестве линеймента с высоким сейсмическим потенциалом.

Применив тектоническую карту [7] в качестве фона и сделав визуализацию (в режиме *отрисовки механизмов очагов*) крупных событий последнего десятилетия (рис. 3а), мы увидим, что события этой цепочки локализируются в области бреши между протяженными тектоническими выступами (tectonic bulges) и относятся к различным сеймотектоническим сегментам:

1. Первые три левых события цепочки и малоглубинный форшок (9.03.11), находящийся чуть севернее главного события, а также удаленный отклик (11.03.11) в южной части области имеют надвиговый механизм.
2. Среднее событие – сдвиговый механизм.
3. Три правых события цепочки обладают сбросовым механизмом, как и землетрясение, произошедшее через месяц после Тохоку события на южном побережье префектуры Фукусима, чуть южнее фукусимских атомных станций.

Смена типов механизмов землетрясений в целом соответствует направлению основных тектонических деформаций региона.

Разрез по профилю АА (рис. 3а), направленному вдоль простираения основных тектонических зон региона, показывает (рис. 4а), что хотя центр наиболее

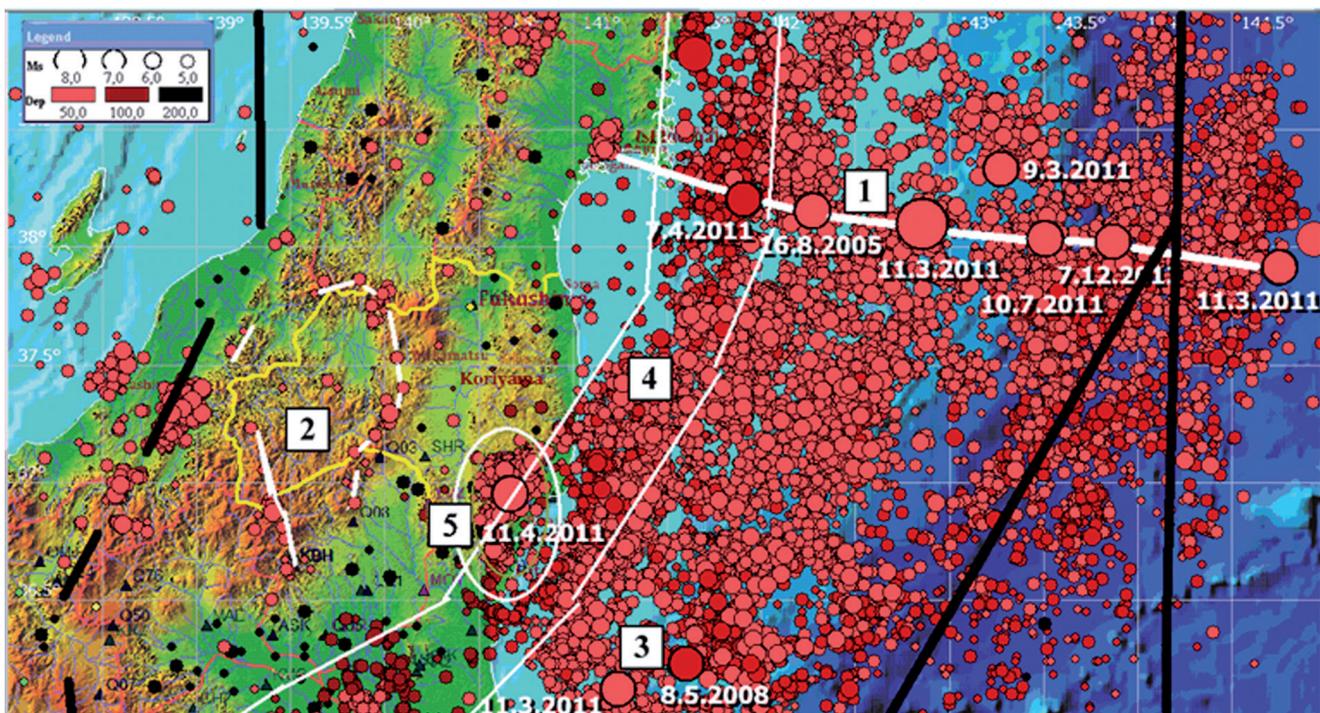


Рис. 2. Сейсмичность $M_s \geq 3,5$ (13742 событий) близ побережья Фукусимы, с 2003 по 2013 г.

плотного распределения сейсмичности после Тохоку землетрясения и сместился вправо от главного события, однако район между очагом Тохоку и его форшоком по-прежнему остается слабоактивным, особенно в отмеченной на рис. 4а зоне шириной 15 км. Это позволяет предположить присутствие жесткой линейной структуры, направленной вкрест простирания профиля АА. Смещение плиты вдоль этой структуры могло привести к возникновению каскада разрушительных событий на ее края.

Факт существования жесткой неоднородности вдоль 38-й параллели подтверждается и другими наблюдениями, например, по присутствию здесь положительной аномалии скоростей *P*-волн [9, 10] (рис. 3б): «Высокоскоростные аномалии в зоне мегаземлетрясения могут быть вызваны погружающимся океаническим хребтом, подводными горами или другими топографическими выступами на морской поверхности Тихоокеанской плиты, которые становятся препятствием при тесном взаимодействии субдуктирующей Тихоокеанской и перекрывающей ее континентальной плит» [11]. Кроме того, по латеральному распределению скольжений (slip) в очаге землетрясения Тохоку и другим наблюдениям некоторые авторы [12] предполагают наличие «направленной в сторону суши океанической разломной

зоны, контролирующей изменение морфологии плиты вдоль 38-й параллели» [12, 13].

Разрез по профилю ВВ (рис. 3а), перпендикулярному линейным структурам региона и направленному вдоль 38-й параллели, показывает (рис. 4б), что расположение очагов землетрясений соответствует зоне сочленения Тихоокеанской и континентальной плит. Механизмы сжатия соответствуют зоне погружения Тихоокеанской плиты и ее взаимодействия с континентальной плитой, механизмы растяжения – району, где океаническая плита испытывает растяжение, отмеченное также в работе [8]. Сильнейшее событие располагается в зоне наименьшей глубины нижней границы наиболее сейсмоактивного слоя.

Таким образом, мы рассмотрели пример первичного информационного анализа сейсмичности в системе EEDB с помощью выборки, сортировки и визуализации. Были использованы такие дополнительные процедуры визуализации, как: процедура отрисовки стереограмм механизмов на карте и разрезе (с вычислением вертикальной проекции стереограмм), в которой используется многослойная (в режиме XOR) заливка ассиметричных овалов, рассчитываемых по данным каталога механизмов; процедура отрисовки механизмов в векторной моде (в виде осей растяжения

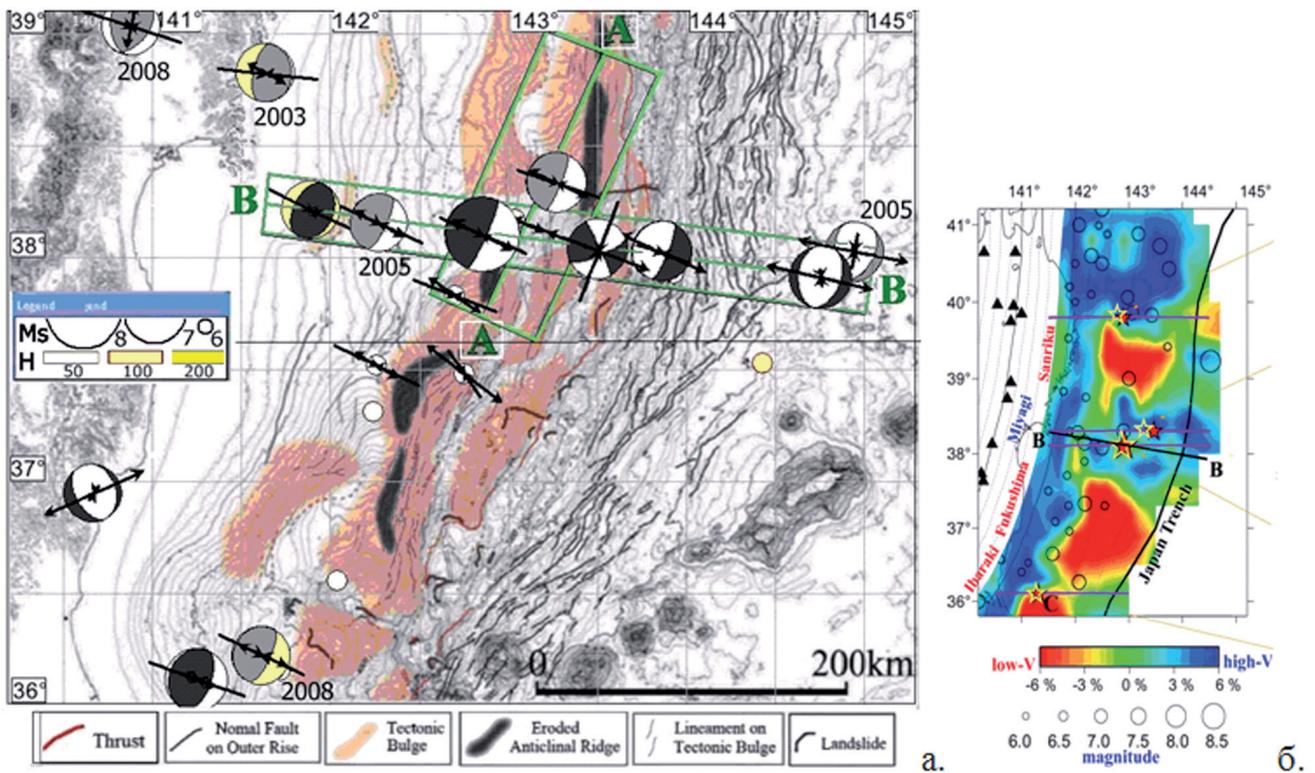


Рис. 3. Линейная структура (ВВ): а – на тектоно-геоморфологической карте [7] (светло-серой заливкой показаны события до Тохоку-землетрясения, темно-серой – после); б – на томографической карте *P*-волн [9]. Очаги землетрясений с $M_s \geq 7$ выведены в виде сферических и векторных диаграмм механизмов (а)

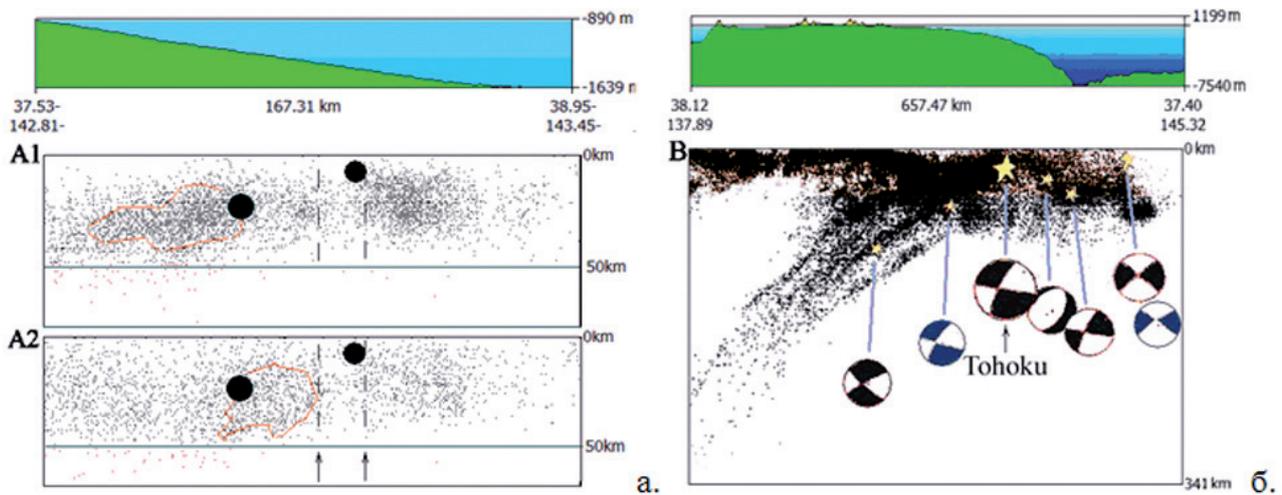


Рис. 4. Разрез, построенный в EEDB, по профилям, показанным на рисунке 3а: а) AA – для всей сейсмичности до землетрясения Тохоку (A1) и после него (A2), отмечены зоны наиболее плотного распределения сейсмичности; б) BB – для афтершоков землетрясения Тохоку. На разрезе (б) звездочками отмечены события цепочки с $M_s \geq 7$ и показаны вертикальные проекции их механизмов (темно-синим цветом показаны события, произошедшие до 11 марта 2011 г.)

и сжатия); процедура задания и построения профиля с построением вертикального сечения рельефа и сейсмичности с заданными параметрами визуализации; процедура загрузки в среду EEDB произвольной растровой карты в качестве фона; алгоритм распознавания линейных структур по множеству точек пространства и т.д. Во всех показанных примерах используются функции первого столбца схемы (рис. 1), включая выявление афтершоков.

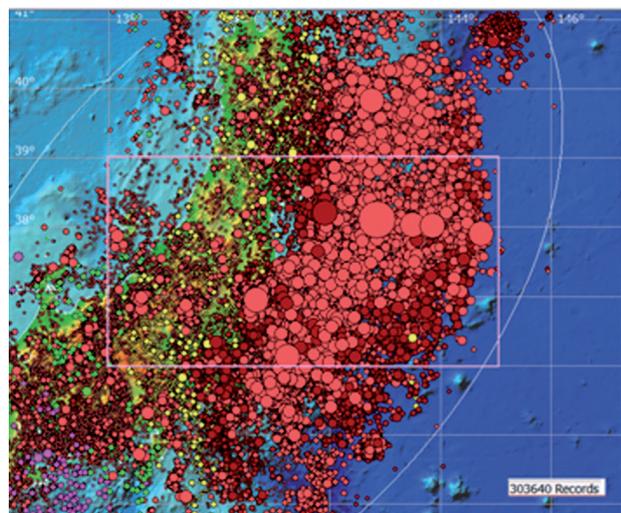
Функция *выявления афтершоков*, реализованная в EEDB, позволяет воспользоваться меню из методов своего выполнения (эмпирический, эллиптический и интерактивный), включая различные модификации эллиптического метода [23]. Эти методы, как известные, так и новые, детально описаны ранее [1, 2]. Оценка эффективности различных алгоритмов в задаче обнаружения афтершоков выполняется с помощью сравнения статистических свойств оставшихся после очищения множеств событий со случайным экспоненциальным распределением Пуассона [14].

Задача выделения афтершоков важна не только при необходимости получить статистически однородное множество событий, но и при детальном изучении сейсмичности, т.к. состояние больших объемов геофизической среды до и после главного события существенно различается.

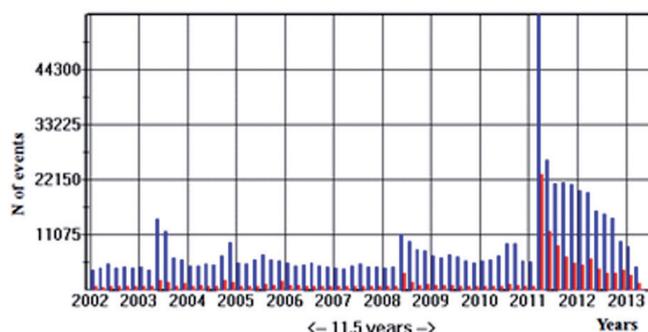
В нашем исследовании применение этой операции позволяет сделать ряд важных выводов. В частности, после применения эллиптического метода удаления афтершоков в районе Фукусимы оставшееся множество событий составляет лишь 14% их

первоначального количества. При этом общее количество удаленных афтершоков составляет несколько сот тысяч событий (303 640 событий – рис. 5а), а афтершоковый процесс (вызванный землетрясением Тохоку) на настоящий момент, скорее всего, еще не окончен – сейсмический фон установился на уровне возможной афтершоковой активации землетрясения Тохоку, но выше фона возможного затишья, и сравнялся с уровнем, активированным сильным событием с $M_w \sim 7$, произошедшим на границе коры 05.26.2003. Глубокое (170 км) землетрясение с $M_w \sim 5,8$ (04.16.2008) поднимает уровень фоновой сейсмичности до такого же уровня, как и коровое событие с $M_w \sim 7$ (см. рис. 5б).

Таким образом, основная часть сейсмичности изучаемого региона не имеет независимой природы, являясь афтершоковой последовательностью землетрясения Тохоку и нескольких других крупных событий. По пространственному распределению афтершоков землетрясения Тохоку (рис. 5а) можно оценить размеры зоны распространения основных сейсмодислокаций этого землетрясения, а вся рассматриваемая нами область, примыкающая к префектуре Фукусима, оказывается частью области афтершоков землетрясения Тохоку, пригодная для ретроспективного поиска прогностических характеристик этого события. При изучении характеристик сейсмического режима статистическими методами (что будет показано далее) будет применяться процедура исключения роев и афтершоков с целью улучшения параметров рассматриваемого процесса, приближая его к стационарному сейсмическому процессу [1, 14].



а.



б.

Рис. 5. Афтершоковый процесс Тохоку землетрясения в пространстве (а) и во времени (б): а – афтершоки землетрясения Тохоку, идентифицированные с помощью эллиптического алгоритма (прямоугольником обозначена область настоящего исследования); б – график числа землетрясений последней декады по 2-месячным интервалам (синие столбцы – все события, красные столбцы – события с $M_s \geq 2$)

Исследование параметров сейсмичности с использованием подсистемы анализа «Fukushima-EEDB»

Исследование аномалий сейсмического режима в системе EEDB можно производить для разных сейсмогеодинамических задач. В этой статье показано использование подсистемы анализа для ретроспективного изучения различных аномалий перед крупным событием (на примере мега-землетрясения Тохоку). Кроме выбора области подготовки изучаемого землетрясения, важно в начале анализа оценить качество используемого каталога. Это позволит в алгоритме исследования, представленном на рис. 1, правильно задать параметры процедур выборки данных. Прежде всего, по выбранному каталогу мы можем выяснить, как во времени изменялись регистрационные характеристики сейсмической сети, применяя следующие функции EEDB:

1. Зависимость $M_s(t)$ наглядно показывает:
 - качественные скачки развития системы регистрации в 1977 г. для $M_s < 3$ и 1987 г. для $M_s < 1,5$ (рис. 6а), которые также отражены в стабильном росте количества зафиксированных землетрясений – в среднем в 3 раза каждый год (рис. 6б);
 - стабилизацию системы регистрации в конце 1997 года для $M_s > 0$ (рис. 6а);

2. График $N(t)$: отмечается еще один рубеж в 2002-2003 гг. (рис. 6б) с последующей стабилизацией качества регистрации (проверено на более детальном интервале).

3. Зависимость Гутенберга-Рихтера $N(M_s)$: на графике повторяемости землетрясений, построенному по методу наименьших квадратов (рис. 6в), выявляются две линейные части: на магнитудах 1,5-4 и 3,5-6,5. Детальное рассмотрение показало, что на изменение наклона в точке $M = 4$ повлияли события с глубиной очага больше ~ 50 км. При удалении глубоких событий график принимает линейную форму, начиная с $M = 2,5$ (рис. 6 г).

При изучении подготовки мега-землетрясения представляет интерес 2-я линейная часть графика: $M_s = 3,5-6,5$ (рис. 6в).

На основе детального анализа перечисленных функций можно сделать вывод, что статистические характеристики сейсмического режима будут наиболее достоверными при следующих параметрах выборки: по времени, и если требуется полнота каталога – 2002-2013 годы, по магнитуде, и если требуется ее представительность – различные значения в зависимости от времени (см. табл. 1).

График повторяемости: $lg N = lg A_m - b(M_s - M_0)$, интересен не только как способ определения статистически однородного магнитудного диапазона, но и содержит параметры, являющиеся характеристиками сейсмического процесса. Это: A – сейсмическая активность, приведенная к определенной магнитуде M_s (связанной пропорциональной зависимостью с энергетическим классом K) и b – наклон графика повторяемости.

Рассмотрим *сейсмическую активность* A [16] в качестве первой характеристики сейсмичности данного региона.

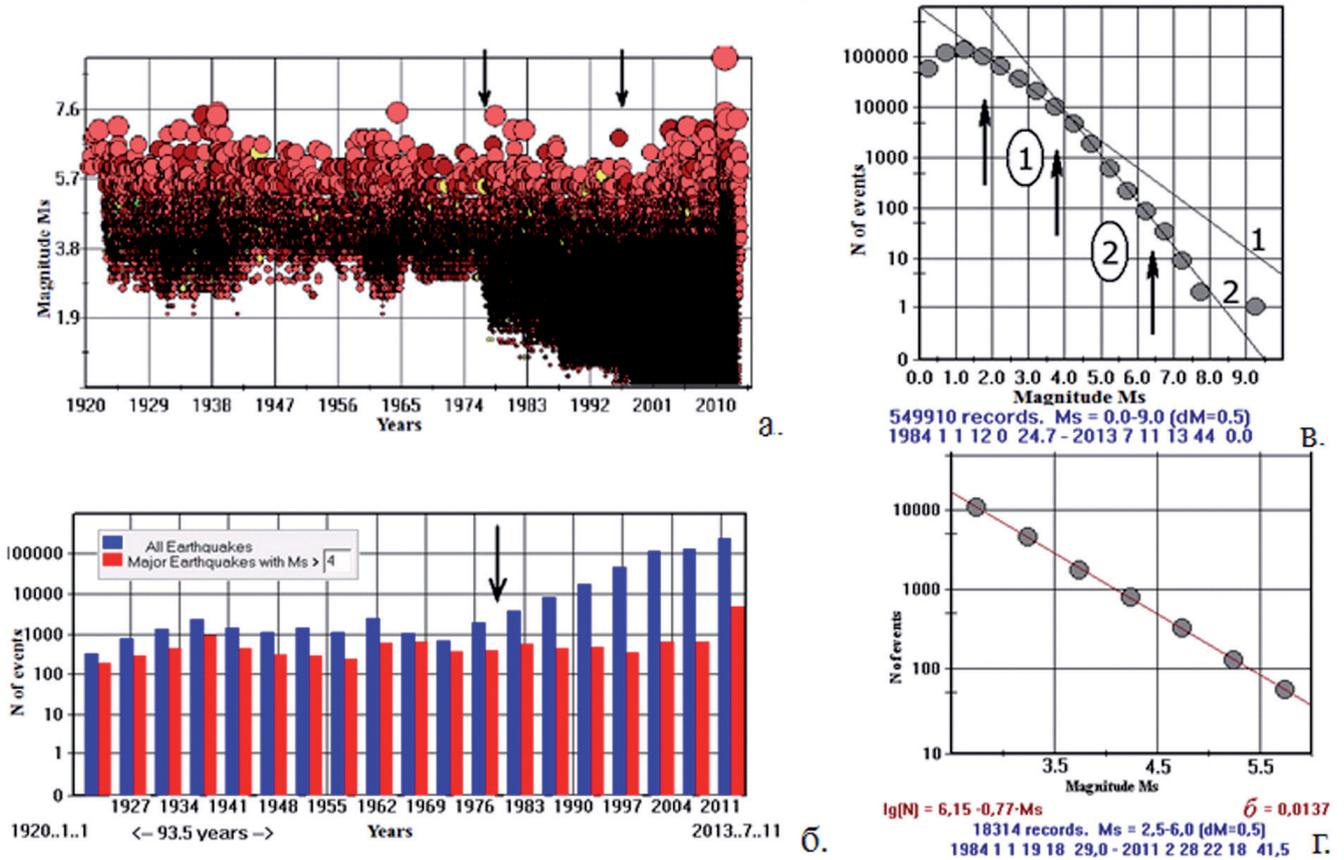


Рис. 6. Графики распределения данных каталога JMA: а – магнитуд по времени; б – числа событий по 5-летним интервалам для всех землетрясений (синий цвет) и для землетрясений с $M_s > 4$ (красный цвет); в – график повторяемости для землетрясений с 1984 года; г – график повторяемости для землетрясений периода 1.1.1984 – 28.2.2011 г. (до Тохоку-события) с $M_s = 2,5-6,0$ и глубиной до 40 км

Таблица 1

Значения представительных магнитуд по интервалам времени

Для интервала времени (в годах):	Представительная магнитуда M_0 :	При ср.-квадратическом отклонении σ ($\Delta M = 0,5$):
1920-1986	4,0	0,026
1987-2001	3,0	0,025
2002-2013	3,5	0,046
Для глубин ≤ 40 км:		
1984-2010	2,5	0,014

Она исследуется *картографическим методом*, подразумевающим расчет и прорисовку изолиний по данным усредненного значения параметра в узлах регулярной пространственной сетки. Полученная карта показывает распределение долговременного тренда сейсмической активности, для получения которого требуется статистическая однородность осредняемой сейсмичности. Пики усредненной за последние 20 лет сейсмической активности A15 (рис. 7), приведенной к 15 классу ($M_s \sim 5,5$), вплотную примыкают к прибрежной области префектуры Фукусима с максимумом в районе г. Хитачи.

Для визуализации пространственного распределения следующей характеристики – *параметра b* – использован другой картографический метод – расчета ряда картограмм по равномерным интервалам времени. При построении зональных картограмм в EEDB производится линейная интерполяция двумерной формулой Бесселя. Полученные карты (рис. 8) показывают в зоне формирования будущего очага землетрясения Тохоку слабо выраженную аномалию отрицательных значений *b*, вытягивающуюся вдоль 38-й параллели на последнем 4-летнем интервале перед толчком.

Выбор временного интервала определен по условию достаточности количества событий в ячейках

осреднения для получения оценок параметра с приемлемой погрешностью. Расчет погрешности осуществляется на основе понятия о представительности выборки: $\varepsilon = |u| / (2\sqrt{n})$, где *n* – объем выборки, а величина квантиля принимается $|u|_{0,95} = u_{0,975} \cong 1,96$ [2]. Понижение параметра *b* за последние 10 лет составляет значение 0,15 (рис. 8б) с погрешностью $\varepsilon = 3,3-2,9\%$. Дополнительный контроль устойчивости полученных оценок производится с помощью расчета среднеквадратического отклонения σ , которое здесь меньше 0,1 в наиболее значимых точках (рис. 8б).

Как известно [17], значения параметра *b* понижаются в случаях перестройки среды, ее консолидации в жесткие структуры, что может свидетельствовать о подготовке сильного землетрясения.

Следующей исследуемой характеристикой сейсмического режима является *относительная суммарная энергия*, выделяемая землетрясениями в единицу времени, отнесенная к фоновому значению поля сейсмической энергии и представляемая в виде: $\log(E_{sum} / E_{norm})$. Преимущество этого нового параметра [18] в его независимости от характера распределения сейсмичности в пространстве (при интерпретации результатов не требуется учитывать плотность сейсмических локализаций в каждой ячейке). На картограммах (рис. 9) видна структура

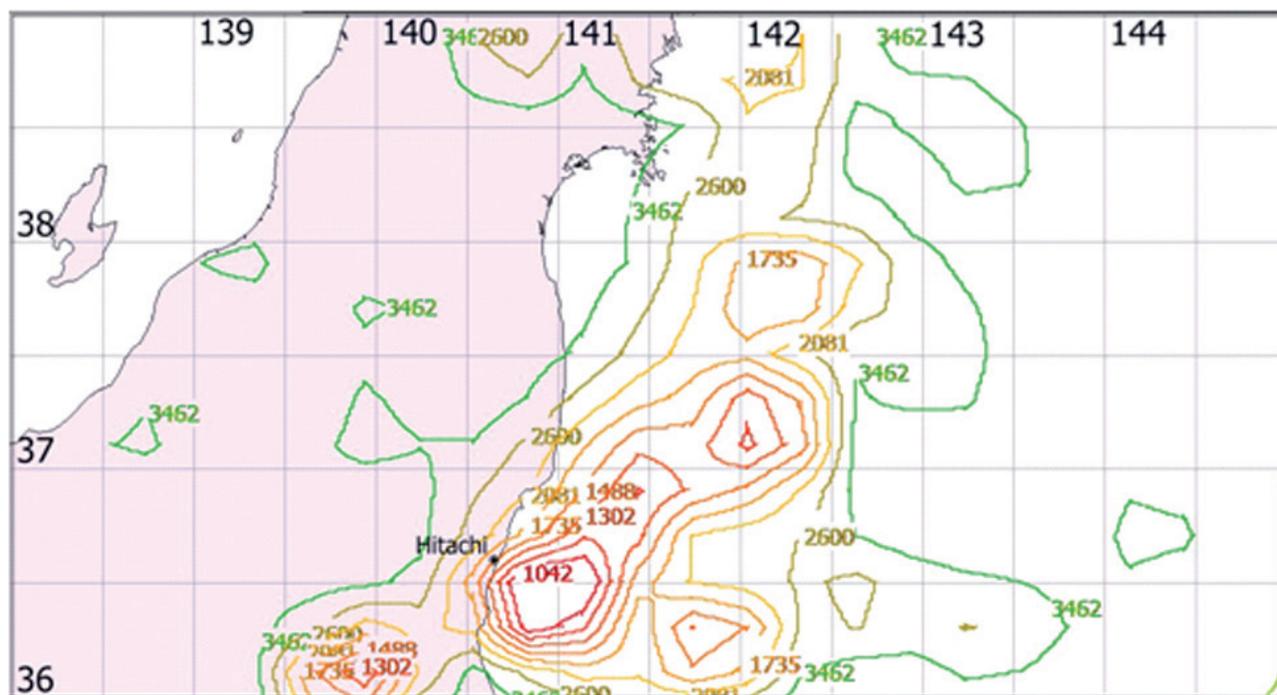


Рис. 7. Сейсмическая активность за 1994-2013 гг. (параметры расчета: $M_s = 3,5-7$, афтершоки удалены). Изолинии выведены в режиме расчета повторяемости событий в количестве лет

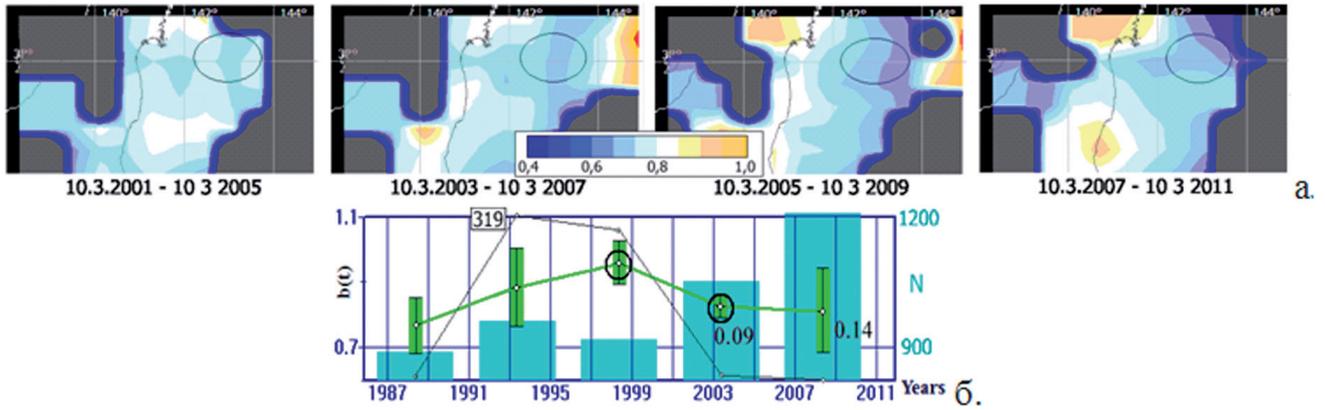


Рис. 8. Изменение параметра b : а – пространственные аномалии по последовательным 4-летним интервалам времени (параметры расчета: ячейки $0,4 \times 0,6^\circ$, $3,5 \leq M \leq 7$, ограничение на среднеквадратичное отклонение $\sigma \leq 0,3$, афтершоки удалены; овалы показывают зону очага будущего землетрясения Тохоку); б – временной график по 5-летним интервалам (вертикальные зеленые отрезки показывают величину σ точек графика повторяемости; синие столбцы – количество событий; черная линия – график отношения количества слабых событий к сильным); овалами отмечены точки с $\sigma \leq 0,09$

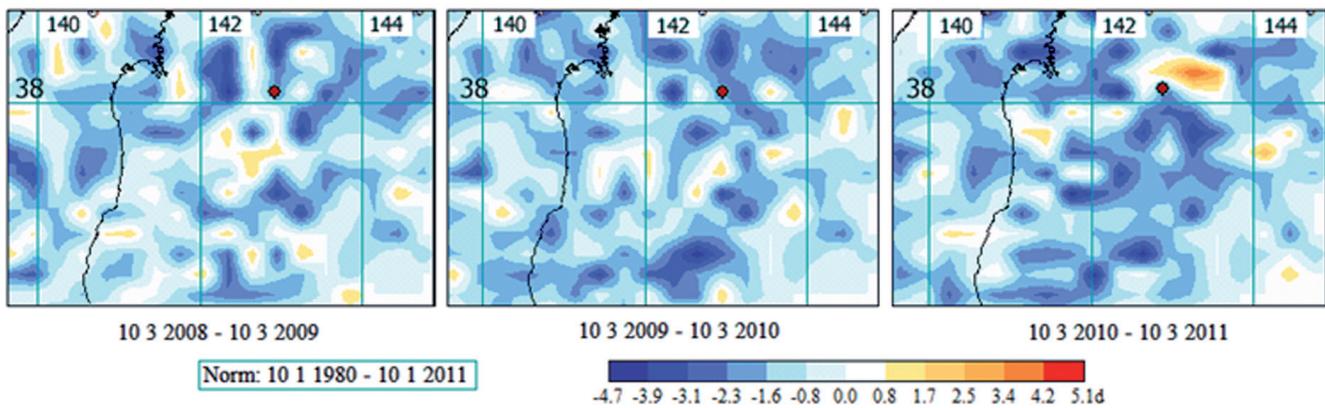


Рис. 9. Относительные сейсмические активизации и затишья (показаны, соответственно, желтым и синим цветом) за годовые интервалы перед Тохоку-толчком (параметры расчета: ячейки $0,2 \times 0,3^\circ$, $3,5 \leq M \leq 6,5$). Очаг будущего толчка показан черно-красным кружком

и динамика затишья, образовавшегося в последние 2 года перед Тохоку-землетрясением. Сейсмическое затишье, появившееся в 2008-2009 гг. в области к северу от центра будущего события, сменилось слабой форшоковой активизацией за год перед главным толчком. При этом в 2010 г. к западу и югу от толчка формируется хорошо выраженное затишье. О действии механизма сейсмической бреши, как основной модели подготовки крупных землетрясений, упоминается многими авторами (например, [19]).

Центр будущего толчка приходится на пограничную область затишья с резким градиентом значений между областями повышенной и пониженной относительной суммарной энергии. Это подтверждает выводы наших исследований 2004 года [20], где было показано по данным Байкальской рифтовой зоны, что большинство крупных землетрясений возникают на границе аномальных областей сейсмического дефицита в точках наибольшего градиента.

Действительно, карта градиентов описываемого параметра в исследуемой области показывает

в последний год перед событиями отчетливые положительные аномалии не только в области будущего землетрясения Тохоку и его форшока (09.03.2011), но и в районе более позднего (11.04.2011) землетрясения на юге префектуры Фукусима (рис. 10б). В процедуре расчета градиента осуществляется поиск максимальной разности между величинами относительной энергии в текущем и соседних узлах расчетной сетки.

Параметр плотности сейсмогенных разрывов, или концентрационный критерий K_{sp} , является наиболее естественным физическим параметром, т.к. использует теорию прочности и концентрационного критерия разрушения твердых тел для описания процессов в очаге землетрясений [21, 22].

В системе EEDB предложено использование этого параметра как характеристики сейсмического режима [2]. Временной кумулятивный график K_{sp} сравнивается с идеализированным графиком равномерного прирастания трещин. Для области подготовки землетрясения Тохоку совпадение графиков наблюдается в последние 6 лет перед событием (рис. 11а). Это может свидетельствовать о смене процесса консолидации среды стадией слабой активизации, обеспечивающей стабилизацию процесса нарастания трещин. Карты пространственного распределения параметра K_{sp} (рис. 11б) дают представление о росте концентрации трещин в области подготовки и в очагах будущих землетрясений – Тохоку и его форшока. Кроме того, на картах отчетливо проявляются контуры линейной структуры ВВ, показанной на рис. 2 и 3, вдоль которой в последнее 10-летие и произошла цепь сильнейших событий региона.

Заключение

Система анализа EEDB позволяет проводить комплексное исследование различных характеристик сейсмического процесса. Функционирование системы анализа поддерживается двумя системами: базой сейсмологических данных и геоинформационной системой визуализации. Визуализация обеспечивается математическим аппаратом вычисления характеристик, позволяющим гибко модифицировать исследования в соответствии с опытом, знаниями и интуицией исследователя. Адаптация и применение инструментария EEDB для изучения сейсмичности территории близ префектуры Фукусима, привели к результатам:

1. Продемонстрировано наличие жесткой линейной структуры вдоль 38-й параллели, направленной вкост простирания Японского желоба и других линейных тектонических структур региона,
2. Сделано предположение, что подвижка 9.03.11, связанная с этой жесткой структурой, могла привести к возникновению каскада разрушительных событий 11.03.11 на ее краях.
3. Средствами системы EEDB исследован каталог агентства JMA на представительность магнитуд, выявлены периоды изменения чувствительности сети станций.
4. Карты долговременной сейсмической активности A15 показали, что наиболее активный район вплотную примыкает к побережью префектуры Фукусима с максимумом в районе г. Хитачи.
5. Обнаружены долго- и среднесрочные аномалии характеристик сейсмического режима

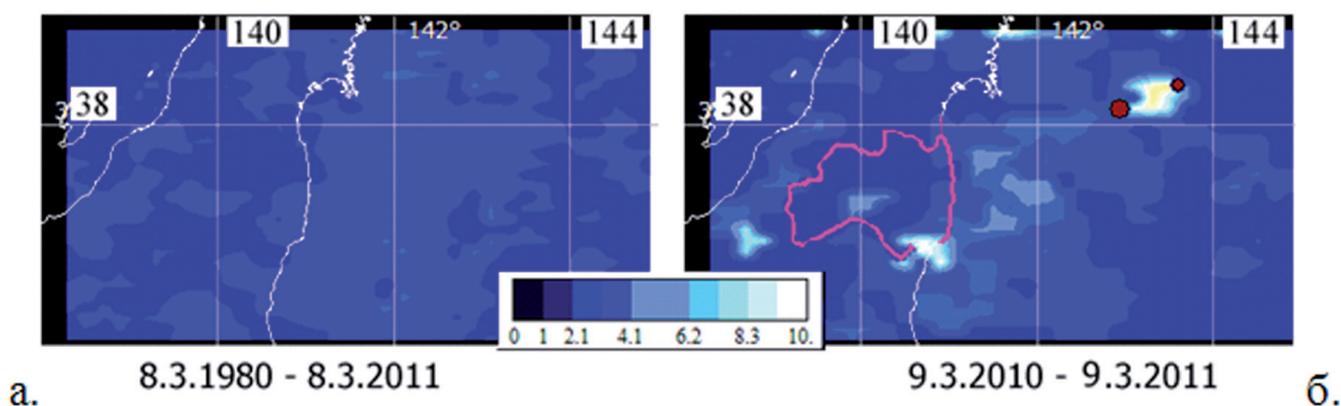


Рис. 10. Карта градиентов относительной сейсмической энергии: а – для фоновой сейсмичности (осредненной за 30 лет); б – для сейсмичности последнего года перед Тохоку-событием (параметры расчета: ячейки $0,1 \times 0,2^\circ$, $3,5 \leq M \leq 6,5$, афтершоки удалены). Будущее Тохоку землетрясение и его форшок показаны черно-красными кружками. В качестве географической привязки нанесены границы префектуры Фукусима

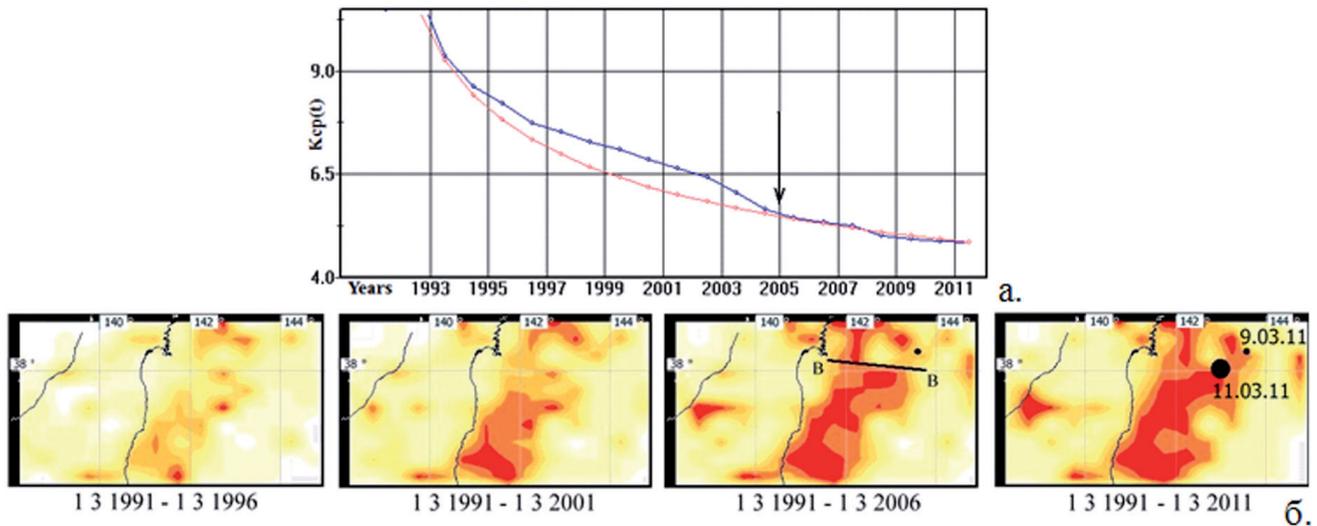


Рис. 11. Кумулятивное изменение концентрационного критерия K_{cp} :
 а – по времени (синяя кривая – реальные данные, красная – идеализированный график равномерного прирастания трещин);
 б – по площади (параметры расчета: ячейки $0,3 \times 0,5^\circ$; $3,5 \leq M_s \leq 9$; $H_{max} = 50$ км).
 Будущее землетрясение Тохоку и его форшок показаны черными кружками

перед Тохоку-землетрясением: 1) слабо-выраженное понижение параметра b за 10 лет перед событием, 2) выполаживание кумулятивного графика плотности сейсмогенных разрывов за 6 лет до события, 3) образование зоны затишья вокруг будущего эпицентра за 2 года, и 4) резкие положительные аномалии градиента относительной энергии в последний год перед толчком.

Все это может свидетельствовать об особенностях пространственно-временной консолидации среды при подготовке мега-землетрясения.

Авторы благодарят профессора Токийского университета Кенью Сатаке (Институт Исследования Землетрясений) за предоставление каталога JMA. Исследование частично поддержано грантом РФФИ 14-05-00688, программой 4 Президиума РАН, проектами МИП СО РАН № 117, 73, 76, 90.

Ключевые слова: сейсмологические программы и системы, базы данных землетрясений, геотехнологии, процессы подготовки землетрясений, аномалии сейсмического режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г. Геоинформационная система GIS-EEDB и методы пространственно-временного анализа сейсмологических данных // Геоинформатика, 2013. – № 2. – С. 58-65.

2. Dyadkov P.G., Mikheeva A.V. The EEDB – Expert Earthquake Database for Seismic Geodynamic Research // Mathematical Modeling in Geophysics : Bulletins of the Novosibirsk ICMMG. – 2010. – N. 13. – P. 15-30.
 3. Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Часть I // Вычислительная сейсмология. – 2005. – Вып. 36: Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. – 179 с.
 4. Omori F. Investigation of aftershocks // Rep. Earth. Inv. Comm. – 1894. – Vol. 2. – P. 103-139.
 5. Лихт Ф.Р. Транзитные линейные морфоструктуры в геоморфологическом пространстве ТПП // Закономерности строения и эволюции геосфер : мат-лы четвертого междунар. междисциплинарного науч. симпозиума. – Хабаровск, 1998. – С. 28-31.
 6. Imanishi K., Ando R., Kuwahara Y. Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compression northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake // Geophysical Research Letters. – 2012. – Vol. 39. – Iss. 9.
 7. Nakata T., Goto H., Watanabe M., Suzuki Y., Nishizawa A., Izumi N., Horiuchi D., Kido Y. Active faults along the Japan Trench and source faults of large earthquakes // Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. – 2012. – P. 254-262.
 8. Полец А.Ю., Ребецкий Ю.Л. Реконструкция поля тектонических напряжений в очаговой области Тохоку землетрясения 11.03.2011 г. // Физические

основы прогнозирования разрушения горных пород : тез. докл. IX Междунар. школы-семинара, Иркутск, 2-6 сентября 2013 г. – С. 66.

9. Zhao D., Huang Z., Umino N., Hasegawa A., Kanamori H. Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9,0) // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – Vol. 38. – L17308.

10. Zhao D. Mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9,0) sequence: Insight from seismic tomography // *Achievement of G-COE Program for Earth and Planetary Dynamics and the Future Perspective : G-COE Symposium 2012, Japan, Sendai, 25-28 September, 2012.*

11. Kanamori H. Rupture process of subduction-zone earthquakes // *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences.* – 1986. – Vol. 14. – P. 293-322.

12. Zhao D., Matsuzawa T., Hasegawa A. Morphology of the subducting slab boundary in the northeastern Japan arc // *Phys. Earth Planet. Int.* – 1997. – Vol. 102. – P. 89-104.

13. Maercklin N., Festa G., Colombelli S., Zollo A. Twin ruptures grew to build up the giant 2011 Tohoku, Japan, earthquake // *Scientific Reports.* – 2012. – 2 : 709, October.

14. Ebel J.E., Kafka A.L. A non-Poissonian element in the seismicity of the Northeastern United States // *Bull. Seism. Soc. Amer.* – 2002. – V. 92. – No. 5. – P. 2040-2046.

15. Ризниченко Ю.В. Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности // *Изв. АН СССР. Сер. Геофиз.* – 1964. – № 7. – С. 969-977.

16. Кузнецова К.И., Шумилина Л.С., Белова Н.А. Об отражении сейсмического процесса в вариациях графиков повторяемости землетрясений // *Прогноз землетрясений.* – Душанбе–Москва : ДОНИШ, 1984. – № 5. – С. 71-84.

17. Дядьков П.Г., Кузнецова Ю.М. Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // *Физическая мезомеханика.* – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 19-25.

18. Kobayashi K. et al. Outer slope faulting associated with the western Kuril and Japan trenches // *Geophysical Journal International.* – 1998. – Vol. 134. – Iss. 2. – P. 356-372.

19. Djadkov P.G., Kuznetsova J.M., Mikheeva A.V. Study of weak seismicity anomalies before strong earthquake at southern areas of Siberia for middle-time forecast // *Asian seismological commission V General Assembly (Yerevan, Armenia, 18-21 October, 2004) : Proceedings.* – Yerevan, 2004. – P. 217-218.

20. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности // *Вестн. АН СССР.* – 1968. – Вып. 3. – С. 46-52.

21. Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // *Изв. АН СССР. Сер. Физика твердого тела.* – 2005. – Т. 47. – Вып. 6. – С. 1000-1008.

22. Прозоров А.Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений // *Вычислительная сейсмология.* – 1986. – Вып. 19: Математические методы в сейсмологии и геодинамике. – С. 58-62.