

Захаров В.С., Симонов Д.А., Коптев А.И.

Геологический факультет МГУ

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГНОЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗОН СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ)

Собраны прогностические данные по наиболее представительным предвестникам (сейсмологическим, деформационным, космо-геодезическим) для области сильных землетрясений Курило-Камчатской дуги 2006 и 2007 гг. Проводится интегральный анализ собранной информации, предложен интегральный прогностический признак.

Введение

Анализ эффективности и информативности предвестников землетрясений различной природы (сейсмологических, геофизических, электромагнитных, гидрогеологических, солнце-луноприливных и других) показал, что для высокосейсмичной Курило-Камчатской зоны наиболее эффективными являются сейсмологические предвестники, проявляющиеся на различных временных уровнях, дополненные деформационными и космо-геодезическими предвестниками (GPS). Это позволяет создать систему целенаправленных работ для выявления предвестников сильных землетрясений на различных временных уровнях для прогнозных оценок будущих сейсмических событий.

Разработанная система в ретроспективном аспекте опробована на примере сильных Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. С этой целью интегрированы данные по наиболее представительным предвестникам, собранные для области Симуширских землетрясений. Это, главным образом, сейсмологические, а также деформационные и космо-геодезические предвестники (GPS), собранные в ГИС-проекты. Созданные ГИС-проекты содержат слои с прогнозной информацией и являются основой для выделения конкретных прогнозных областей.

Долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный прогноз землетрясений.

Теоретической базой при создании данной системы служили положения о разноуровневом временном ходе сейсмичности, на основании чего были разработаны представления о долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном прогнозе землетрясений, в соответствии с макро-мезо-и микро-уровнями проявлениями сейсмического процесса.

Характер сейсмичности на макроуровне проявляется в многолетней цикличности хода сейсмического процесса, обособлении периодов активизации, наличии сейсмических брешей в пространственной картине сейсмичности и соответственно сейсмического затишья в ходе выделения сейсмической энергии, в миграционных процессах гипоцентров, группируемости и структурированности сейсмичности. Таким образом, на макро-уровне рассматривается пространственно-временное распределение гипоцентров землетрясений текущего этапа, выявляются тенденции к группированию (рои землетрясений) и пространственно-временная взаимосвязанность очагов, оценивается вероятность активизации тех или иных активных тектонических структур, которые маркируются, прежде всего, зонами глубинных разломов, тектоническими ступенями, особенностями гравитационного поля и др. Перечисленные характеристики используются для долгосрочного прогноза [Федотов и др., 2004]. Пример представлен на рис.1.

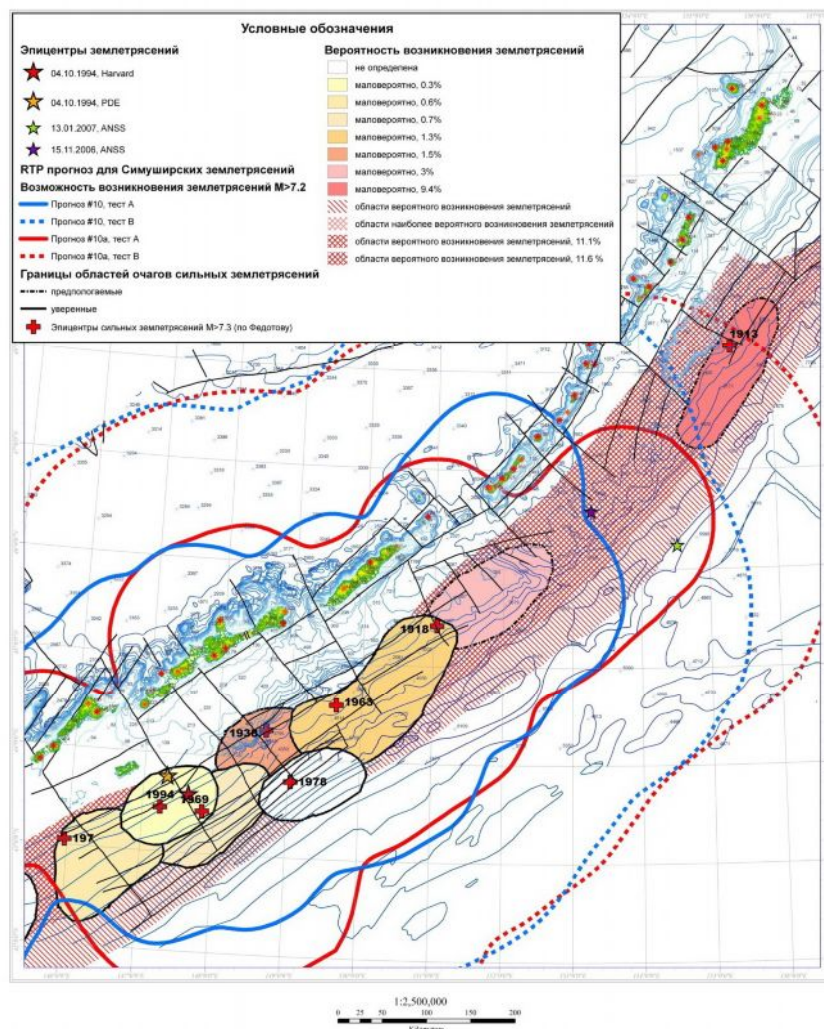


Рисунок 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курильских островов на 2004 - 2008 гг. Нанесены области очагов произошедших землетрясений с $M \geq 7.7$, вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ и указаны вероятности возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ [Федотов и др., 2004]. Для района Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. показана также область прогноза по RTP (по <http://www.igpp.ucla.edu/prediction/rtp/>)

На мезоуровне изучаются некоторые специфические особенности сейсмического процесса, заключающие в себе возможности для **среднесрочного прогноза**. Так, прогностическую значимость в качестве среднесрочного предвестника сильных землетрясений имеет выделение аномалий сейсмического затишья по трем характеризующим сейсмический режим функциям [Соболев, Тюпкин, 1998]: эпицентральной R , временной T и энергетической L (*алгоритм RTL*). Согласно модели этих авторов, пространственно-временные области с отрицательными значениями параметра RTL соответствуют зонам формирования сейсмического затишья, а увеличение параметра RTL после минимума - форшоковой активизации, при этом значительное сейсмическое событие следует ожидать в непосредственной близости к области аномально низких значений RTL (см. рис.2).

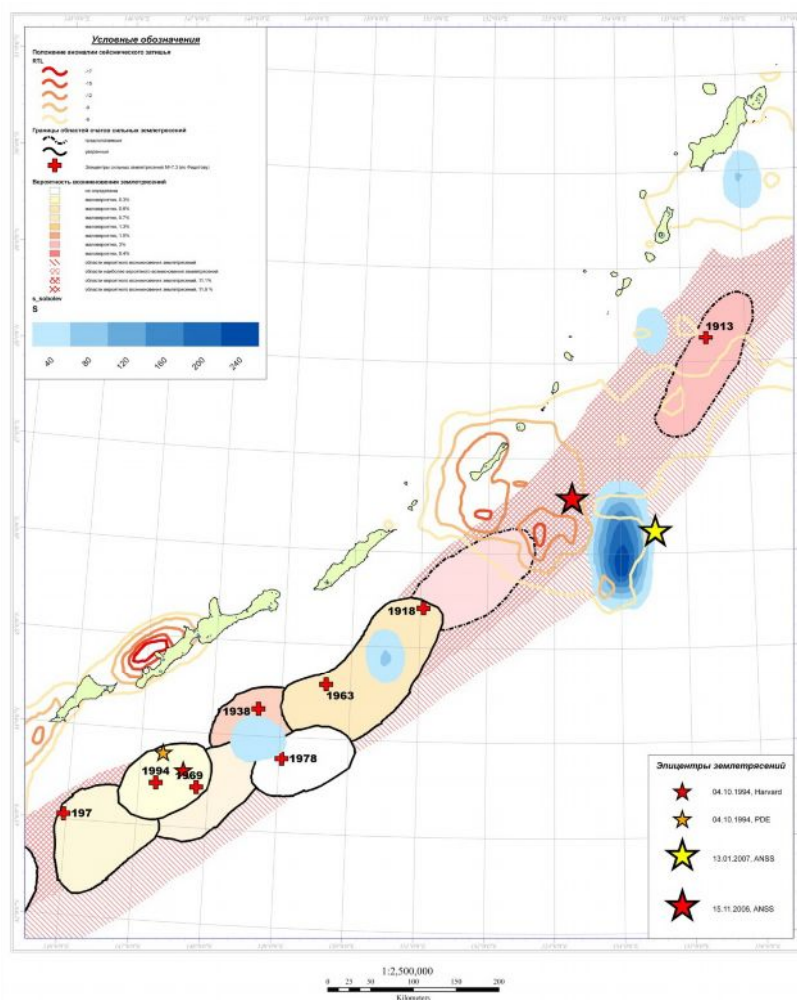


Рисунок 2. Положение аномалии сейсмического затишья в районе о.Симушир на Курилах по прогностическому параметру RTL и стадии форшоковой активизации развития очага землетрясения 15.11.2006 (градиентные голубые области). Показаны эпицентры Шикотанского землетрясения 04.10.1994 и Симуширских землетрясений 15.11.2006 и 13.01.2007 и долгосрочный сейсмический прогноз по [Федотов и др., 2004]

Проводится также разностороннее изучение форшоков землетрясений, в том числе заглубленных форшоков, с использованием данных анализа фокальных механизмов

вместе с исследованием вертикальной и горизонтальной миграции гипоцентров форшоков в районах проявления сильных землетрясений (см.рис.2).

Кинематика подвижек (по СМТ-решениям) в очагах коровых землетрясений используется для выделения аномальных зон, которые представляют прогностический интерес, по С.Л.Юнге. С этой целью изучается также типичность (или аномальность) первых вступлений продольных и поперечных волн на фоне картины, обычно наблюдаемой для сходной пары очаг-станция по соотношению времен их пробега (рис.3).

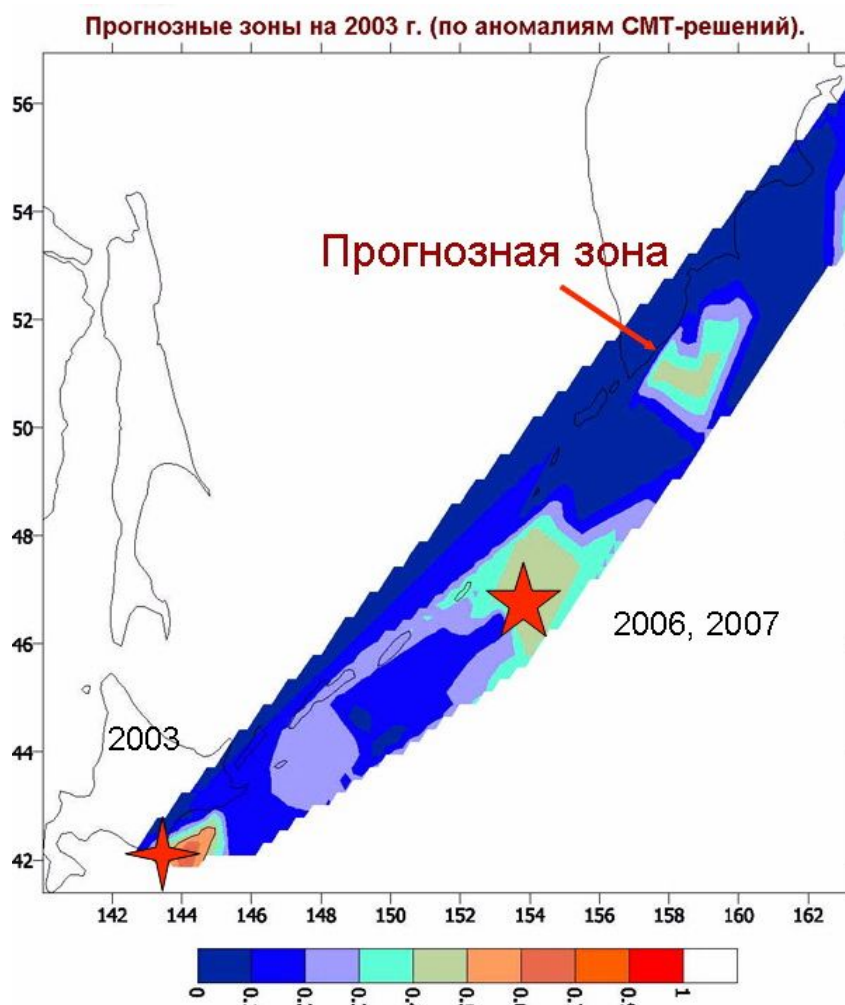


Рисунок 3. Среднесрочный прогноз напряженного состояния, полученный на основании анализа вариации СМТ-решений, по С.Л.Юнге. Показаны эпицентры землетрясения на Хоккайдо 25.09.2003 и Симуширских землетрясений 15.11.2006 и 13.01.2007

Изучение *распределения осей P (сжатия)* глубокофокусных форшоков показало, что их проекции на поверхность пересекаются в зоне потенциально сильного землетрясения. На этом основании области их пересечения служат для визуального выделения потенциально опасных зон [Mogi, 1985; Захарова, Рогожин, 2000], см. рис.4.

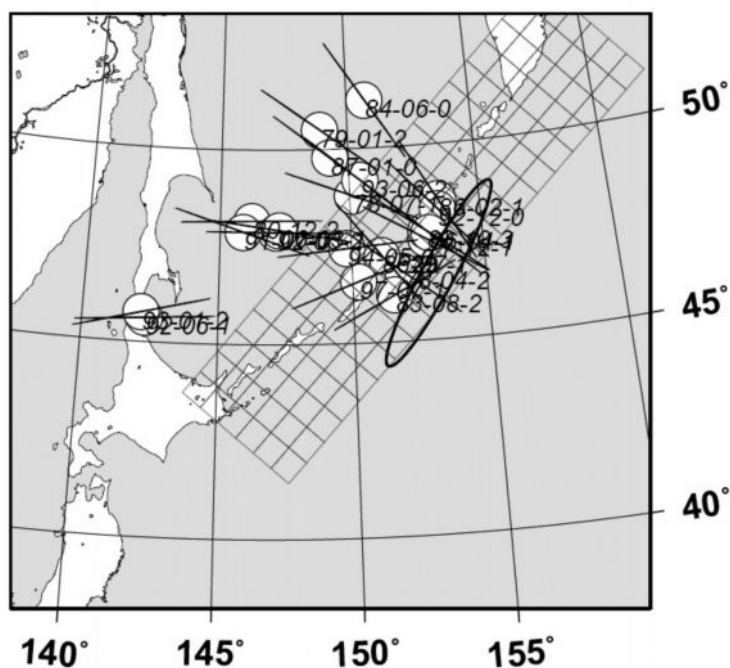


Рисунок 4. Выделение потенциально опасных областей по пересечению осей сжатия в очагах, по [Захарова, Юнгина, 2000]. Овалом показана область визуального выделения. Сетка – область дальнейшего количественного анализа

Поскольку продолжения осей не пересекаются точно в одной области, разработанный С.Л.Юнгой модифицированный метод позволяет ввести количественную характеристику для данной методики и построить карту введенного параметра плотности (рис.5).

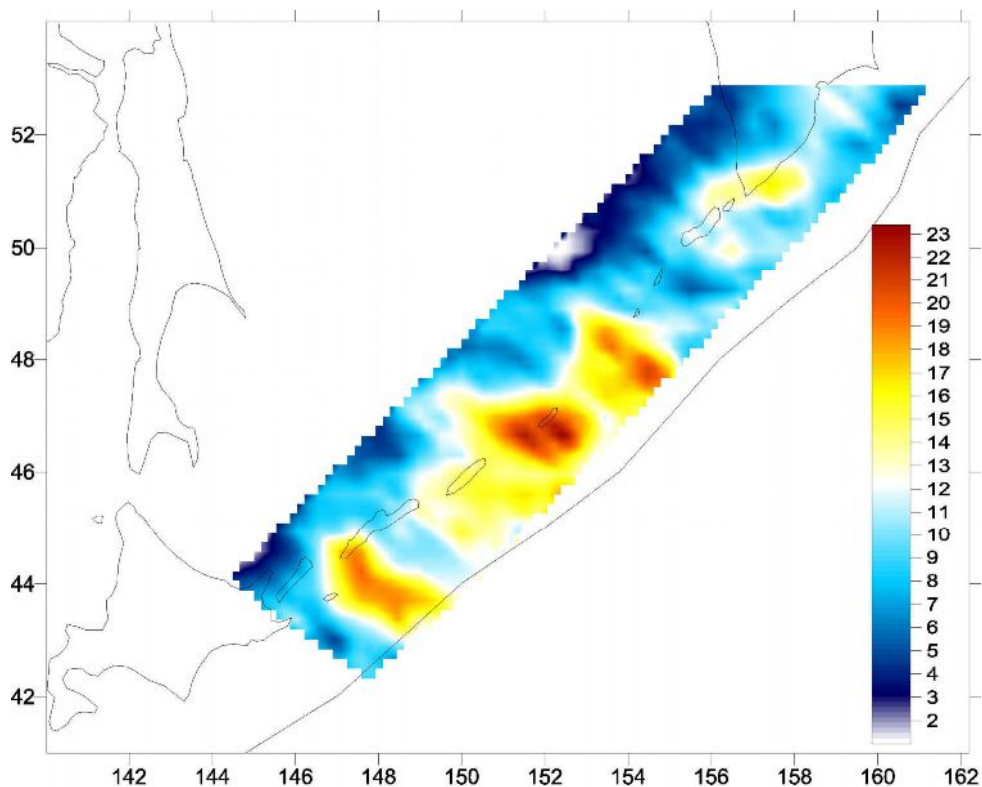


Рисунок 5. Результаты вычисления параметра по пересечению осей сжатия по методике Захаровой-Юнги. Цветом показаны значения параметра

В последние годы используется так называемое «Обратное прослеживание предвестников» - ОПП (*Reverse Tracing of Precursors - RTP*), основанное на явлении возрастания радиуса корреляции сейсмичности в отдельных регионах перед сильными землетрясениями [Шебалин, 2005]. Выявляются так называемые цепочки землетрясений, которые проявляются за 1–9 месяцев до сильного землетрясения. В зависимости от магнитуды прогнозируемого толчка они могут состоять из одного или нескольких десятков землетрясений и иметь линейные размеры от сотен до 1000 км и более. Цепочки служат в качестве среднесрочного предвестника сильного события (см. рис.1).

На **микроуровне** исследуется *спектральный состав колебаний* для определения своего рода "жесткости" очагового излучения, характеризующего степень созревания очага сильного землетрясения. Данная методика выделения форшоков сильных событий основана на анализе спектральных характеристик записей землетрясений [Чепкунас, Рогожин, 2002]. Согласно методике, для форшоков сильных землетрясений характерны аномальные высокочастотные колебания. Вводится параметр N , который в этом случае принимает аномально низкие значения. При этом нормальными считаются значения $N \geq 10$, аномальными $N < 10$. По этому принципу выделяются характерные землетрясения-предвестники (рис.7).

Данные GPS предоставляют весьма ценную информацию о динамике сейсмоопасной зоны перед и во время сильных землетрясений. Пространственное распределение скоростей GPS позволяет судить о распределении напряжений в крупном участке земной коры и по их изменению оконтуривать возможные прогнозные области. Данные по скоростям и смещениям по GPS для Курильской гряды (относительно Североамериканской. плиты), по [Steblov et al, 2007, Kogan et al, 2007, Steblov et al, 2008], показаны на рис. 8.

Интеграция прогнозной информации, полученной по различным методикам

Разработка, апробация, проверка и адаптация каждой из представленных выше методик прогноза – совершенно отдельное и весьма сложное и трудоемкое дело. Автор каждой методики разрабатывает свои критерии надежности и достоверности прогноза. Полученные ими прогнозные результаты имеют несомненную научную и практическую ценность. Однако именно вследствие сложности, фундаментальности и (зачастую) неоднозначности прогноза авторы методик, как правило, сосредотачиваются на какой-то одной.

Используя последовательно сужающийся во временном масштабе комплекс сейсмологических данных, содержащих прогнозную информацию, достигается

возможность постепенного выявления и оконтуривания прогнозной области – в рассматриваемом конкретном случае - от всей сейсмоактивной области Курило-Камчатской дуги до выделения практически конкретной эпицентральной области сильных Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг.

Разработанная система основана на принципе *интегрирования* прогнозных признаков, получаемых по различным методикам. При этом прогнозные области по разным авторам для одного потенциально опасного в сейсмическом отношении региона, совмещаются и накладываются друг на друга. Эффективный инструмент для этого предоставляют программные средства ГИС. Информационные слои, содержащие прогнозную информацию по различным методикам, созданные на предыдущем и текущем этапе, легко интегрируются и визуализируются.

Информация в прогнозных слоях весьма разнородна. *Условно* ее можно разделить на следующие типы, различные с точки зрения представленных видов данных:

- контуры, определяющие только *географическое положение* прогнозных областей. Например, области, полученные по признаку ООП (RTP), рис.1.
- контуры, определяющие положение прогнозных областей области с указанием некоторых *прогнозных характеристик, характеризующих* эти области, например, области наиболее вероятных землетрясений, по [Федотову и др., 2004] с указанием вероятности их возникновения (рис. 1, 2, 6).
- пространственно-распределенное *непрерывное поле* некоторой прогнозной характеристики, часто заданное в изолиниях. Например, прогностический параметр RTL по Г.А.Соболеву (рис.2), параметр s для форшоковой активизации по Соболеву (рис.2), аномалии СМТ-решений по С.Л.Юнге (рис.3), области, выделяемые по методике Е.А.Рогожина и А.И.Захаровой (рис. 4) с усовершенствованиями С.Л.Юнги (рис. 5).
- *дискретная* информация. Например, положение форшоков, выделяемых по аномально высокочастотным колебаниям сейсмических записей по Л.В.Чепкунас (рис.7), данные по скоростям и смещениям по GPS по Стеблову (рис.8).

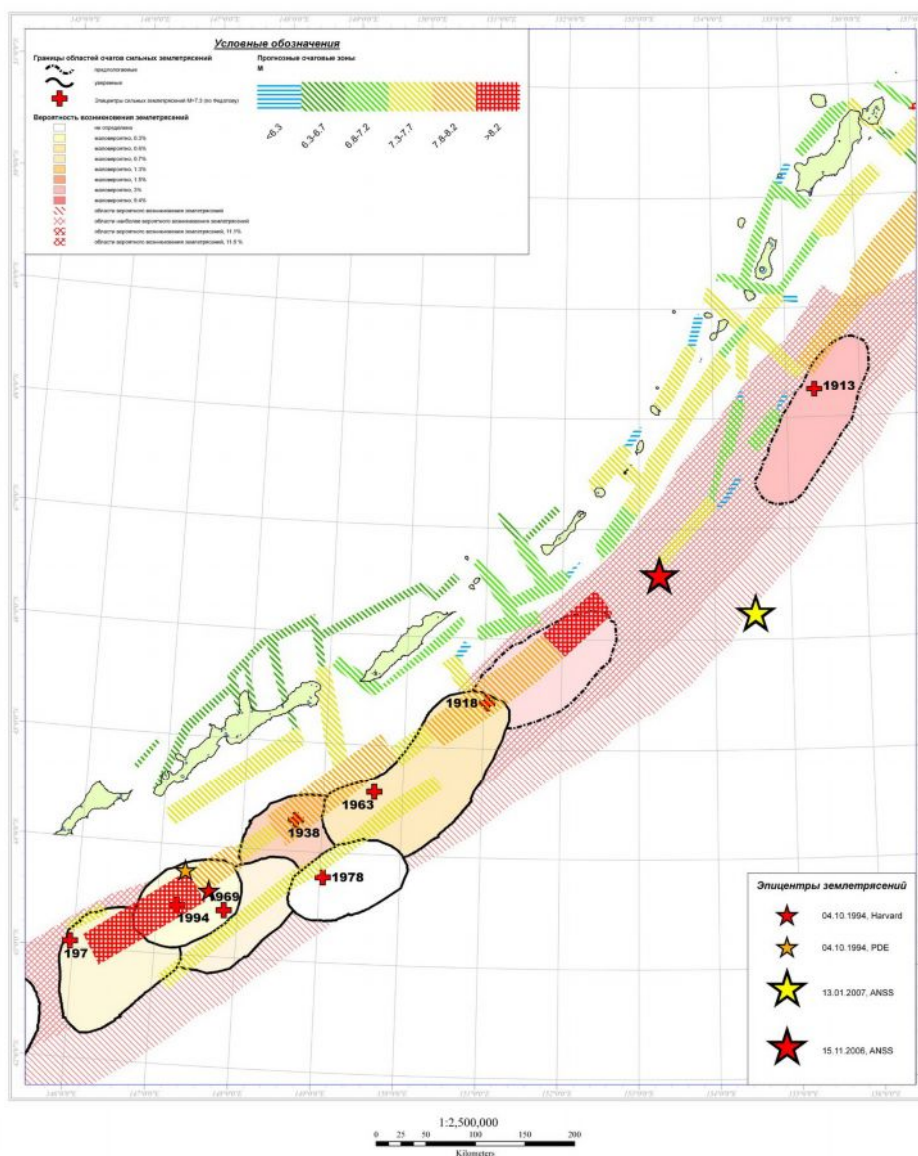


Рисунок 6. Оценка сейсмического потенциала коровых землетрясений Курило-Камчатской островной дуги. Показаны эпицентры землетрясений 2006 г. и 2007, по [Рейснер, 2000, Рейснер, Рогожин, 2001, Рейснер, Рогожин, 2003] и долгосрочный сейсмический прогноз по [Федотов и др., 2004]

Визуальный анализ прогнозных зон.

Вследствие большой разнородности интегрируемой прогнозной информации большое значение имеет *визуальный анализ* совмещаемой прогностической информации, проводимый специалистом – экспертом. Особенно это касается первой, второй и последней групп прогнозных данных. Программные средства ГИС позволяют достаточно легко совмещать прогнозные слои в любых комбинациях: по два, три, или более. Конкретный выбор анализируемых прогнозных слоев осуществляется исследователем. На рисунках 1,2,6,7,8 представлены варианты таких совмещений.

Совмещение всех прогнозных слоев представлено на рис.9. Эта обобщенная информация достаточно сложна для анализа, однако представляет большую информацию и дает возможность наиболее обоснованного и эффективного прогноза.

Итак, область возникновения Симуширских землетрясений находится, согласно долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курильских островов на 2004 - 2008 гг. (по Федотов и др., 2004), в зоне *вероятного* возникновения землетрясений (с вероятностью не ниже 10% (рис.1).

В пределах отмеченной зоны выделяются области *аномально низких* значений параметра RTL: у о.Итуруп и о.Симушир. Близко к «симуширской» аномалии RTL находится и зона *повышенного значения параметра s* форшоковой активизации, по Г.А.Соболеву. В этом районе расположены эпицентры Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. (рис.2).

Прогнозные области напряженного состояния (вариации СМТ-решений) с *относительно высоким значением параметра* - 0.4-0.5 также соответствует эпицентральной области Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. (рис.3).

В пространственном распределении параметра, характеризующего область потенциально сильного землетрясения по схождению продолжений линий *осей сжатия*, выделяются *три зоны максимумов*: восточнее о.Шикотан, у о.Симушир и у о.Матуа. «Симуширская» аномальная зона близка к положению эпицентров Шикотанского землетрясения 1994 г. и Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. (рис.5).

Землетрясения - *предвестники с аномальными спектральными характеристиками* записей находятся достаточно близко от положения очагов сильных Симуширских событий (рис.7).

Кроме того, вся часть Курильской гряды, начиная с о.Симушир и южнее до Японии, находится *в области прогноза по ОПП (RTP)*, см. рис.1, 9.

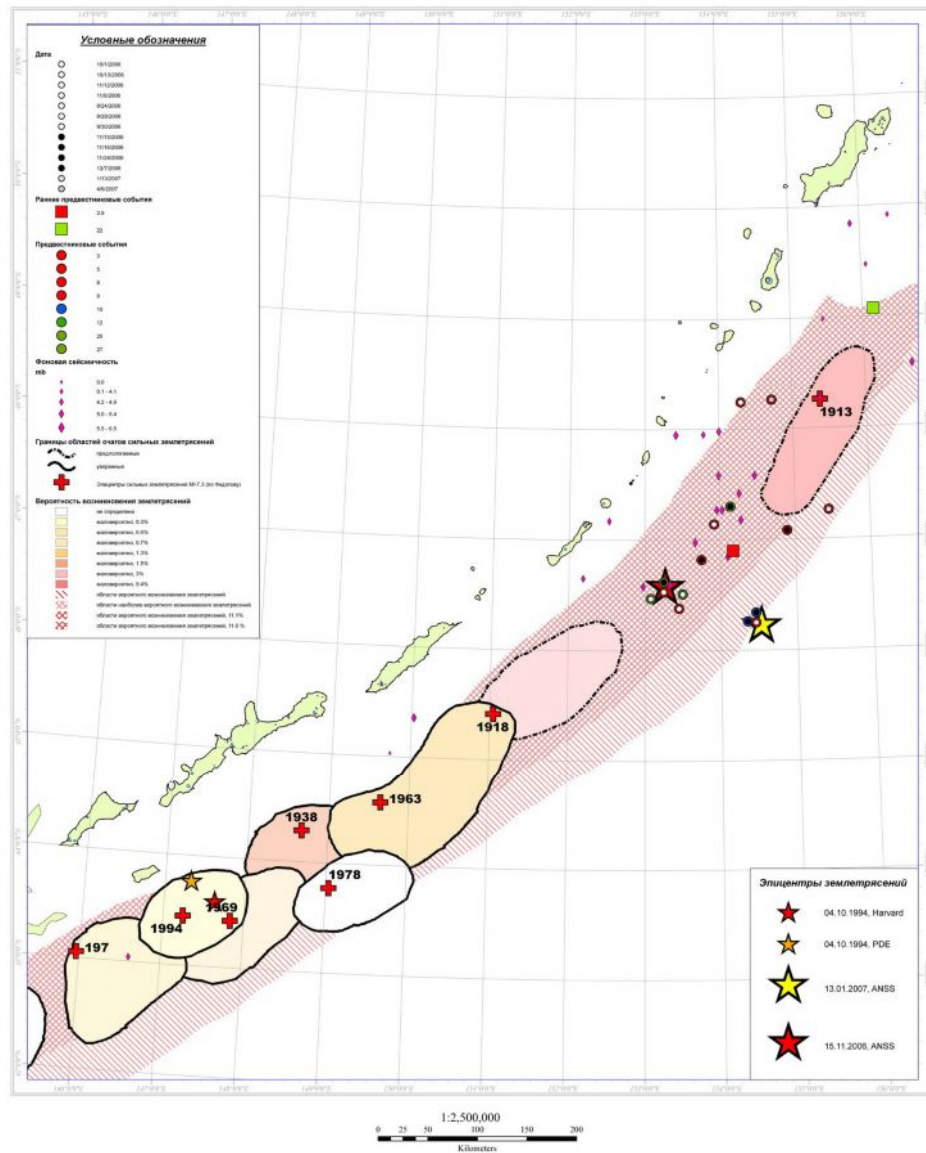


Рисунок 7. Характеристики землетрясений по спектральным характеристикам записей [Чепкунас, Рогожин, 2002]. Положения очагов фоновых землетрясений (фиолетовые ромбы). Землетрясения с вычисленными значениями спектрального параметра N : ($N < 10$) – красные круги, $N > 10$ – зеленые круги. Центральная часть кругов показывает время землетрясения: белая – до 15.11.06, черная между 15.11.07 и 13.01.07, серая – после 13.01.07. Показаны эпицентры землетрясений 2006 и 2007 г. и долгосрочный сейсмический прогноз по [Федотов и др., 2004]

Дополнительную информацию о потенциальной опасности центральной части Курильской гряды дает пространственная закономерность распределения скоростей GPS вдоль дуги (рис.8). Она демонстрирует «блокировку» центральной части Курил, что косвенно указывает на потенциальную сейсмическую опасность зоны.

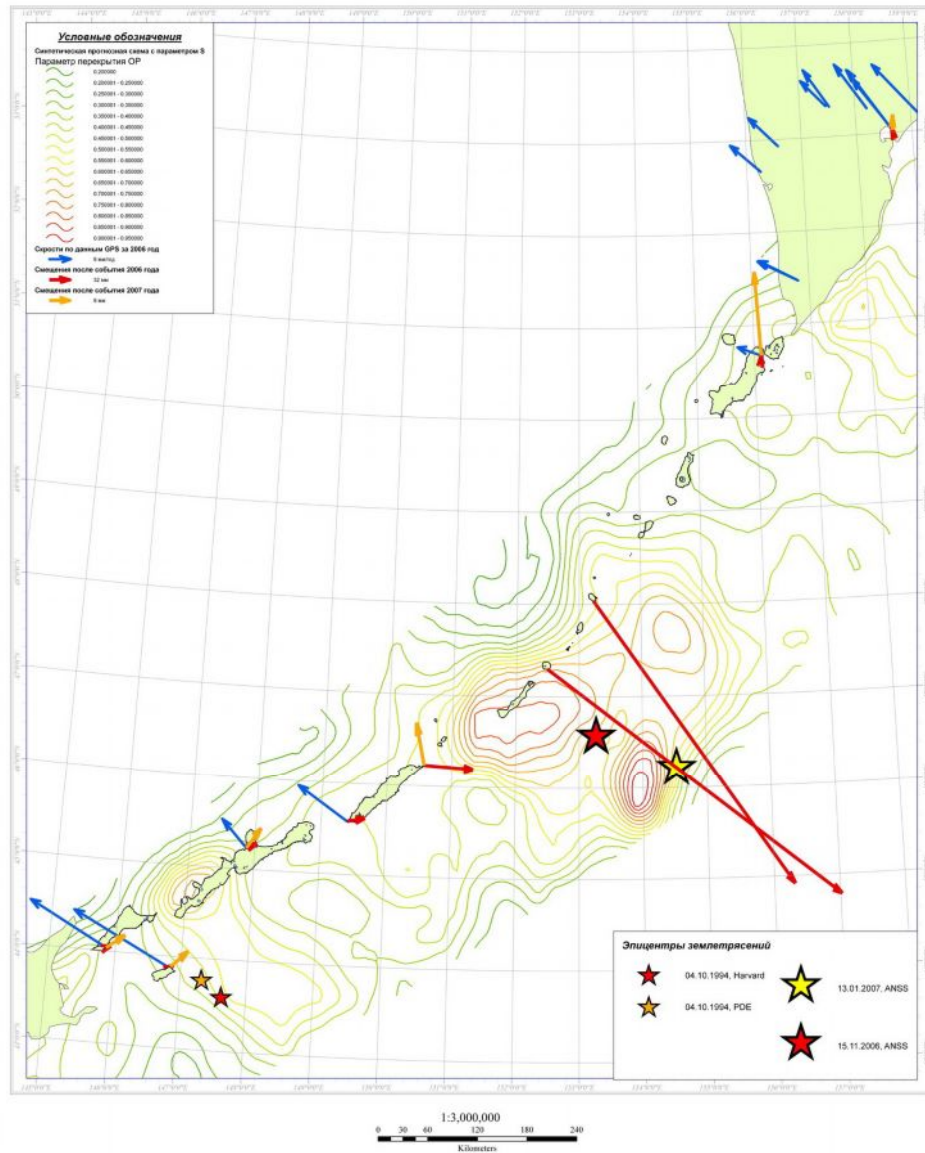


Рисунок 8. Данные GPS для Курильских островов и Камчатки. Горизонтальные скорости GPS (синие стрелки, мм/год) для Курильских островов и Камчатки с июля 2006 г. по ноябрь 2006 г., по [Steblov et al, 2007, Kogan et al, 2007, Steblov et al, 2008] Горизонтальные косейсмические смещения сразу после 1-го (15.11.2006) сильнейшего землетрясения (красные стрелки, мм) и сразу после 2-го (13.01.2007) сильнейшего землетрясения (оранжевые стрелки, мм). Масштабы для косейсмических смещений 2002 и 2007 гг. на рисунке различаются в 4 раза. Изолиниями показан интегрированный прогностический параметр OP

Анализ пространственного расположения прогнозных зон по отдельным признакам показывает их эффективность. Однако подход, основанный на сопоставлении и интеграции прогнозных признаков (как было описано выше), получаемых по различным методикам, позволяет увеличить надежность прогноза. Конечно, прогнозные зоны по разным методикам не одинаковы, но, и это представляется весьма важным, весьма сходны.

Такая близость дает основания для более достоверного выделения «интегрированной» прогнозной зоны. Наиболее опасной в сейсмическом отношении по

предлагаемой методике является пространственное множество, в котором пересекаются – или хотя бы близко сходятся, – прогнозные зоны отдельных методик. На рисунке 9 показана такая «интегральная» прогнозная зона, выделенная по результатам визуального анализа.

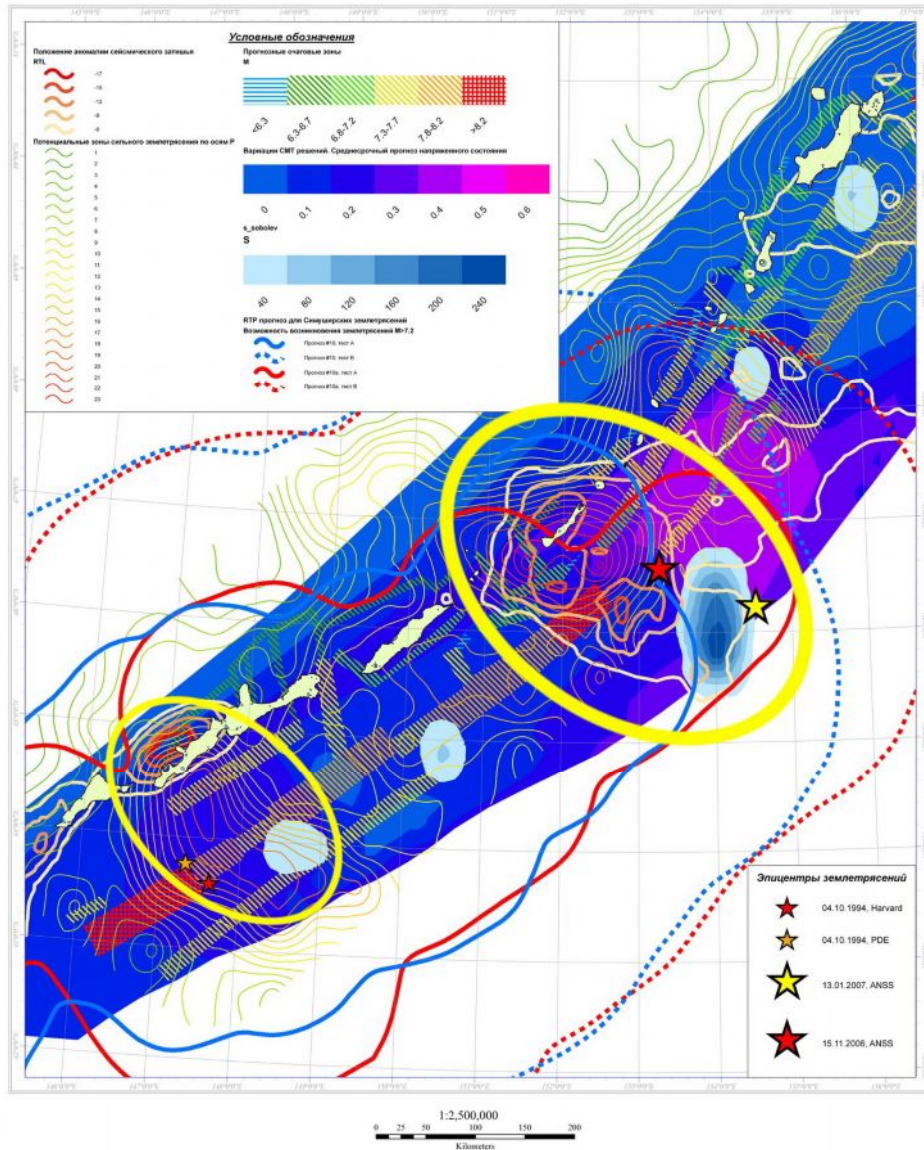


Рисунок 9. Интегральные прогнозные зона (желтые эллипсы), выделенная по результатам визуального анализа. Более жирным показана область с большей вероятностью сильных событий

Количественный анализ прогнозных зон

Третья из перечисленных групп прогностических признаков позволяет получить новый интегрированный прогностический критерий путем не визуального, а количественного наложения набора признаков. Для пространственно-распределенных критериев, которые характеризуют степень аномальной сейсмической опасности (т.е., фактически, вероятность возникновения событий) можно применить следующий метод.

Поскольку диапазон изменения каждого из прогностических параметров различен, необходимо произвести их перенормировку таким образом, чтобы они изменялись в одинаковых пределах (например, от 0 до 1) и вероятность возникновения увеличивалась одинаковым образом (например, при возрастании). При такой процедуре необходимо учитывать возможный диапазон вариаций каждого параметра.

Затем проводится суммирование получившихся нормированных характеристик, что дает новый интегрированный прогностический параметр, который также нормируется на 1 (рис.10). Условно назовем этот параметр ОР (overlay parameter) – в соответствии с методикой его получения. Отметим, что параметр ОР не является вероятностью возникновения землетрясения, но показывает (в порядке возрастания) области, характеризующиеся повышенной опасностью возникновения сильных землетрясений.

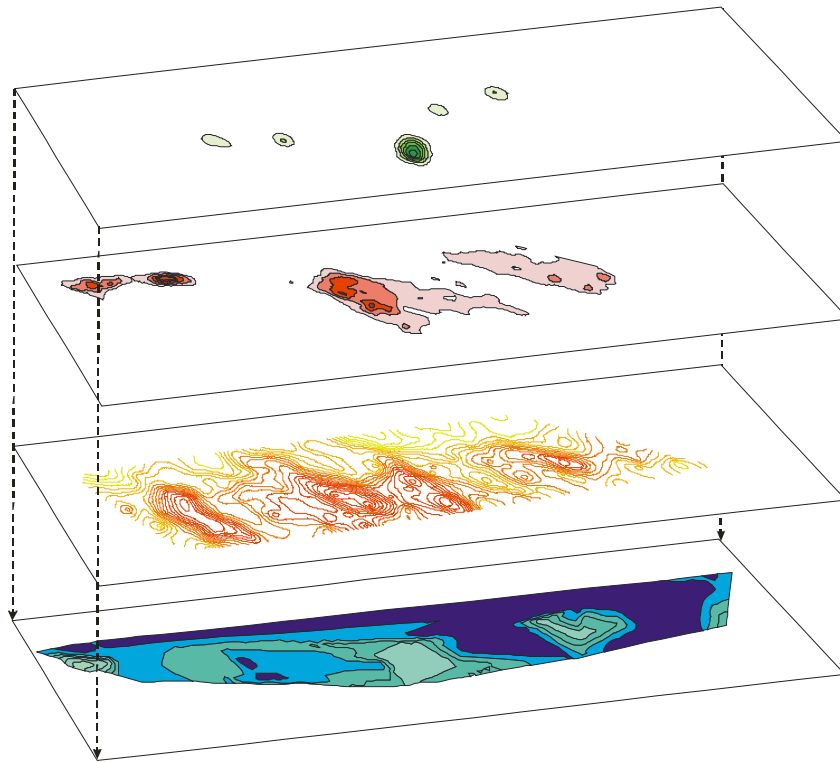


Рисунок 10. Наложение и суммирование рассчитанных нормированных гридов

Результат расчета синтетического прогностического параметра ОР в изолиниях представлен на рисунке 11. По-видимому, следует выделить пороговое значение интегрального параметра ОР, выше которого он считается аномальным, и выделять соответствующие прогнозные зоны. На рисунке 11 показана прогнозная область, выделенная по пороговому значению параметра $OP \geq 0.5$.

Еще раз отметим, что, в силу большой разнородности анализируемого и интегрируемого прогностического материала, приведенный выше *количественный* анализ

и наложение *не может заменить* визуальный анализ. Эти виды анализа, как представляется, разумно дополняют друг друга.

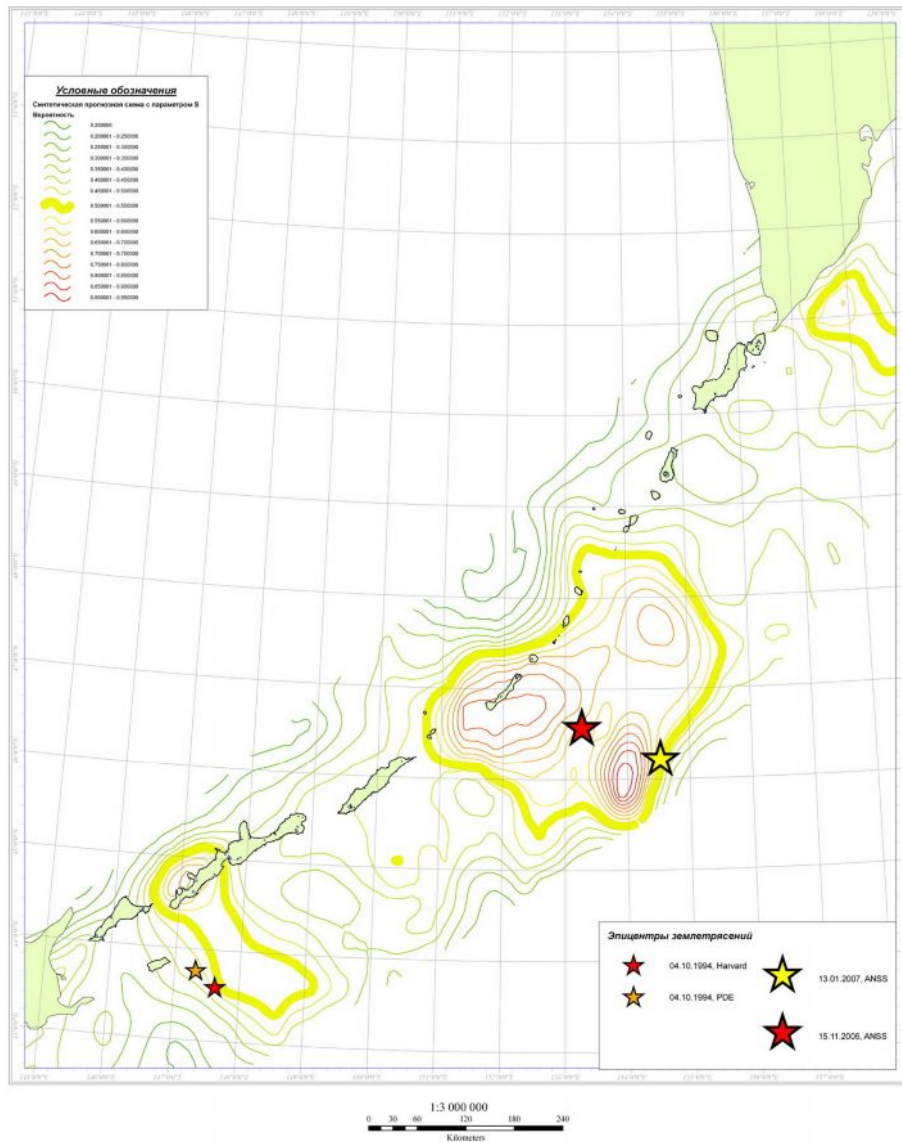


Рисунок 11. Прогнозная область (обведена желтым), выделенная по пороговому значению параметра $OP \geq 0.5$

Анализ вклада отдельных признаков в интегральный прогностический параметр

Для количественной оценки вклада отдельных признаков в интегральный прогностический параметр будем использовать количественное сопоставление полей этих признаков с полями данными, характеризующими реальный сейсмический процесс.

В качестве этих данных будем использовать *количество* N произошедших сейсмических событий и выделившуюся *сейсмическую энергию* E . Информация по этим характеристикам получена при анализе каталогов землетрясений.

В качестве меры, характеризующей степень соответствия прогнозных полей (интегральных и по отдельным параметрам) используется локальное (т.е. в малой пространственной области) *квадратичное отклонение* полей прогностических признаков

от полей энергии E (и количества событий N). Данные по энергиям и количеству необходимо нормировать для того, чтобы сопоставление было адекватным, т.к. прогностические параметры нормированы согласно методике их вычисления (рис.12,13).

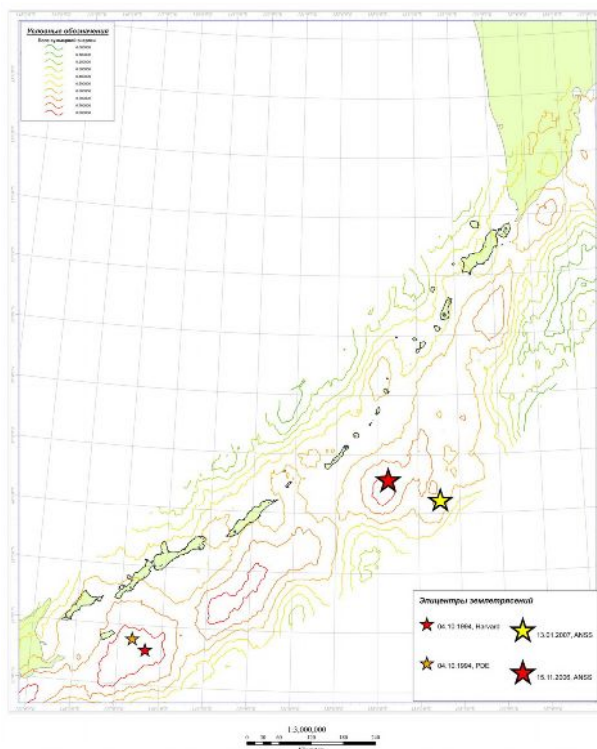


Рисунок 12. Поле выделившейся энергии, рассчитанное на основании каталога PDE за 1990-2007 гг. (в логарифмической шкале, нормированное)

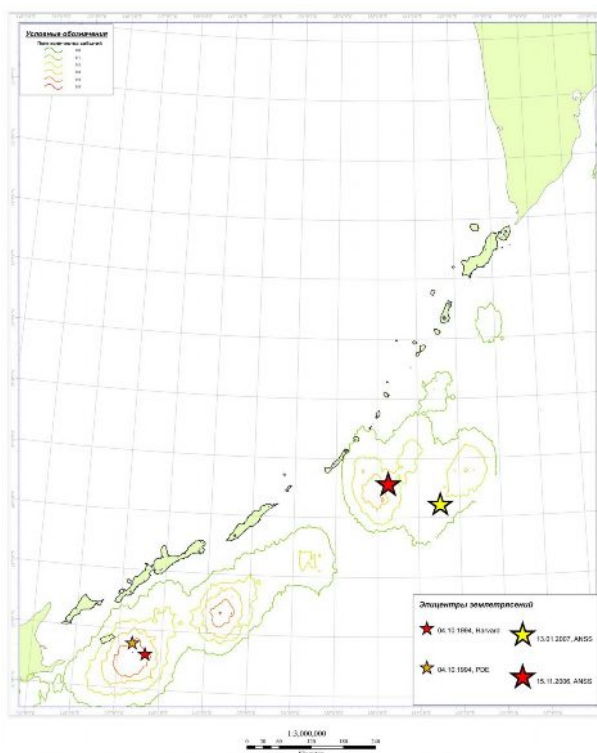


Рисунок 13. Поле количество событий, рассчитанное на основании каталога PDE за 1990-2007 гг. (нормированное)

Для каждого признака рассчитывается и строится поле значений *квадратичное отклонение* σ^2 , которое анализируется. Кроме того, рассчитывается среднеквадратичное отклонение по всей анализируемой области.

На основании сопоставления поля энергии со случайным полем за пороговое значение принимаем величину $\langle \sigma^2 \rangle = 0.2$: если для каких-либо полей величина $\langle \sigma^2 \rangle$ равна или превосходит 0.2, то следует считать эти поля не коррелированными. В случае же, когда $\langle \sigma^2 \rangle$ меньше порогового значения 0.2, то считаем, что поля коррелированы, и связь между ними *тем больше, чем меньше* значение $\langle \sigma^2 \rangle$ (это следует из самого смысла среднеквадратичного отклонения).

На рис.14 представлено рассчитанное квадратичное отклонение σ^2 , между полем энергий и полем интегрального прогностического параметра ОР. Значительная часть полоса вдоль Курильской гряды от о.Хоккайдо до Ю.Камчатки находится в зоне значений квадратичного отклонения $\sigma^2 < 0.2$, особенно зона Симуширских землетрясений, которые располагаются в зоне значений $\sigma^2 < 0.1$, что свидетельствует о неплохой корреляции между этими полями.

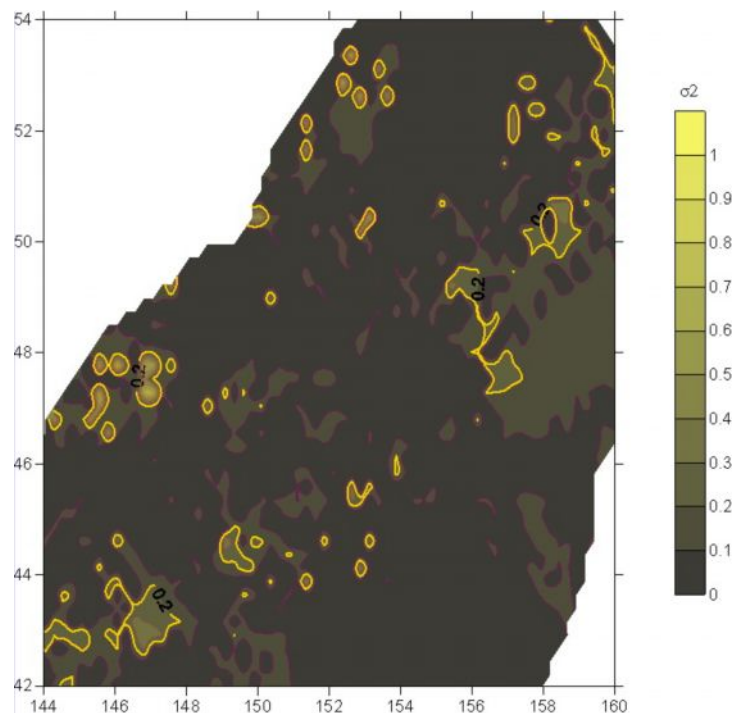


Рисунок 14. Рассчитанное квадратичное отклонение σ^2 , между полем энергий и полем интегрального прогностического признака ОР, представленным на рис. 1

Результаты, полученные для *средних значений* $\langle \sigma^2 \rangle$ для указанных полей представлены в таблице 1. В ней признаки выстроены в порядке убывания этого показателя относительно поля энергий.

Нами выбрано именно это поле для окончательного сопоставления по причинам, указанным выше: большинство прогностических признаков относятся к энергетическим.

Для поля количества событий наиболее успешным является параметр s для форшоковой активизации.

Таблица 1
Значения $\langle \sigma^2 \rangle$ для сопоставления полей прогностических признаков и полей энергии E и количества событий N

Поля	E	N
	$\langle \sigma^2 \rangle$	$\langle \sigma^2 \rangle$
<i>Случайное</i>		
rnd	0.19	0.28
<i>Отдельные прогностические признаки</i>		
Пересечение осей сжатия	0.076	0.201
СМТ-решения	0.086	0.310
RTL параметр	0.098	0.135
s параметр	0.145	0.044
<i>Интегральный признак ОР</i>		
ОР	0.077	0.154

Кроме приведенных выше расчетов для оценки вклада отдельных признаков в общий эффект нами оценивался также коэффициент корреляции между отдельным признаком и интегральным признаком ОР. Результаты представлены в таблице 2. Признаки в ней выстроены в порядке убывания коэффициента корреляции

Таблица 2
Коэффициенты корреляции между прогностическими признаками и интегральным признаком ОР

Признак	R
СМТ-решения	0.713
Пересечение осей сжатия	0.621
RTL параметр	0.582
s параметр	0.253

Эти количественные оценки, вместе с приведенным выше анализом, позволяет упорядочить рассматриваемые прогностические признаки по степени *их влияния (вклада)* в суммарный эффект (в порядке *убывания*):

- параметр, определяемого по пересечению осей сжатия;
- параметр напряженного состояния по СМТ-решениям;
- параметр по методу RTL;
- параметр s для форшоковой активизации.

Отметим, что эта градация совпадает с проведенной выше визуальной оценкой.

Представленные результаты получены в ходе научно-исследовательской работы по теме «Междисциплинарные разномасштабные исследования моделей и характеристик сейсмического возбуждения верхних оболочек Земли и разработка методов, методик и

технологий комплексного диагностирования предвестников землетрясений в активных геодинамических зонах Северной Евразии», шифр «2007-5-1.5-21-01-019» в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», государственный контракт № 02.515.11.5013.

Литература

Захарова А.И., Рогожин Е.А. Сильные землетрясения северо-западной окраины Тихого океана и их глубокофокусные предвестники. Вестник ОГГТН РАН, 2000, 2(12), [URL:http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/2-2000/precursors.htm#begin](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/2-2000/precursors.htm#begin).

Федотов С. А., Соломатин А. В., Чернышев С. Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2004 - 2008 гг. и ретроспективный прогноз Хоккайдского землетрясения 25 сентября 2003 г., М=8.1. // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки, 2004, с.178-201.

Федотов С. А., Чернышев С. Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1986 - 2000 гг., развитие метода и прогноз на 2001 - 2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2002. №6. С. 3 - 24.

Рейснер Г.И. Экстрарегиональный (внерегиональный) сеймотектонический метод оценки сейсмического потенциала (Ммакс). // Природные опасности России. Сейсмические опасности, М., 2000, раздел 3.4, С. 59-65.

Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. Сеймотектоника переходных зон на примере Курильского региона.// ДАН, 2001, т. 381, № 4, с. 536-538.

Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. Сеймотектоника и геодинамика переходных зон на примере Курильского региона. // Вулканология и сейсмология, 2003, № 1. С. 42-53.

Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Стадии подготовки, сейсмические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. N 6. С.17-26.

Шебалин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями. – Вулканология и сейсмология, 2005, №1, с. 3-15.

Чепкунас Л.С., Рогожин Е.А. Спектральные параметры форшоков сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги как прогностический признак времени главного толчка. // ДАН, 2002, т.387, #1, с.108-111.

Mogi K. Earthquake Prediction. Academic Press, 1985.

Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. Coseismic and Postseismic Deformations From Great 2006-2007 Kuril Earthquakes Revealed by

Regional GPS Observations. // Eos Trans. AGU, 2007, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G13A-0916.

Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. Coseismic Deformations From Great 2006-2007 Kuril Earthquakes Revealed by the Regional GPS Network. 2008 UNAVCO Science Workshop. <http://achaea.unavco.org/public/meetings/2008/scienceworkshop/viewabstract.asp?id=2142>.

Kogan M., Steblov G., Vasilenko N., Frolov D. Resolving Coseismic Stress Drop, Afterslip, and Viscous Relaxation Caused by Mw=8.3, November 15, 2006, Kuril Earthquake: Evidence from GPS. 2008-2012 Unavco Proposal: Geodesy Advancing Earth Science Research. 2007. http://www.unavco.org/pubs_reports/proposals/2007/facility2007/section3/UNV-GRID-SPREAD-EC_16.pdf