

УДК 550.34.01:681.3

© А.С. Закупин

А.С. Закупин

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА НЕУСТОЙЧИВОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Введение

Во многих работах ранее уже отмечалось, что деформационные процессы в земной коре, отражением которых является сейсмический процесс, зависят от различных факторов естественной и антропогенной природы [1, 2, 4-6]. В частности, как показано в [7, 10, 13, 14], деформации, обусловленные лунно-солнечным взаимодействием (приливы), относятся к числу подобных факторов. Действительно, кажется очевидным, что вариации приливных напряжений должны влиять на сейсмические процессы. К примеру, суточные и полусуточные приливы имеют амплитуду, достигающую 30 мбар и пиковую скорость нагружения порядка 20 мбар/час. Такие приливные осцилляции значительно превышают скорость роста тектонической нагрузки (порядка 1 мбар/час). Несмотря на это, лишь в нескольких работах была обнаружена сильная корреляция [13, 14]. Так в работе [13] для анализа влияния приливного фактора использовалась методика, основанная на изучении поведения критерия отклика нагрузки-разгрузки (в дальнейшем LURR – load-unload response ratio,  $\gamma$ ), которая основана на вычислении фактора Кулона – Мора по значениям приливных напряжений и построении временных распределений сейсмических событий по отношению к фазам этого фактора. При обращении к параметру  $\gamma$  (отношение откликов среды на нагрузку/разгрузку) предполагается, что отношение сейсмичности во время увеличения приливных напряжений к сейсмичности на фазе их уменьшения имеет аномально высокие значения (больше 1) строго перед сильным сейсмическим событием. На этой стадии геосреда находится в околокритическом состоянии и становится более чувствительной к динамическим возмущениям, наподобие приливных нагрузок, по сравнению с обычным состоянием (соответствующем асейсмическому периоду). Расчет параметра  $\gamma$  проводился по высвобождению усредненной сейсмической энергии за периоды, когда градиент эффективного приливного напряжения соответственно положителен  $X_+$  и отрицателен  $X_-$ . В [13] временные зависимости отношения  $\gamma(t)$  строились для ряда эпицентральных областей сильных землетрясений, произошедших в Китае, Австралии и США

(Калифорния). Было показано, что практически для всех случаев значения  $\gamma$  существенно увеличивается перед событием, причем задержки составляют от нескольких месяцев до полутора лет. В то же время широкого распространения этот метод не получил, хотя авторы оригинальных работ продолжают его развивать, что демонстрируется в работе [15]. При анализе работ [13, 14] складывается впечатление, что, несмотря на оригинальную идею прогноза сейсмической опасности, метод не обрел популярность вследствие неудачного представления результатов. На отдельных графиках демонстрировались периоды от 2 до 3 лет и при значении скользящего окна 60 дней графики содержали 10-15 точек. Кроме того, на многих графиках существенное превышение порога в 1 происходило тогда, когда окно уже перекрывало спрогнозированное событие (половина окна в 360 дней – это 6 месяцев), то есть данные точки могли бы быть получены уже постфактум и к прогнозу отношения не имеют. Прогноз сейсмической опасности является актуальной задачей для нашей страны, которая имеет несколько регионов, находящихся в сейсмоактивных зонах, а потому было бы интересно апробировать данный метод у нас. С учетом большого комплекса требуемых расчетов, необходимых для реализации методики, появилась потребность в специализированном ПО. В данной работе пойдет речь о программном комплексе «Seis-ASZ», который был разработан в ИМГиГ ДВО РАН для выполнения расчетов по методу LURR. Апробация метода осуществлена для каталогов одного из сейсмоопасных регионов РФ – Дальнего Востока и, в частности, Сахалина. С помощью комплекса проведены расчеты, представлены результаты анализа и интерпретация, оценены возможности метода.

## Методика исследования

### 1. Теоретические основы прогноза методом LURR, особенности алгоритмов

Отправной точкой метода анализа отношений откликов является несомненное положение, что на стадии упругого деформирования значения откликов одинаковы  $X_+ = X_- (\gamma = 1)$ . Как только деформирование материала выходит за пределы упругости,

$X_+$  становится больше  $X_-$ , и параметр  $\gamma$  начинает возрастать. Это значение становится больше, по мере того как материал горной породы приближается к быстрой фазе образования макроразрыва, что можно интерпретировать как подкритическое поведение вблизи точки потери устойчивости.

Как было уже упомянуто, подобные циклические фазы нагружения и разгрузки геосреды происходят как раз в результате действия гравитационных сил межпланетного взаимодействия. Алгоритм расчета приливных напряжений и определения фазы основан на расчете тензора приливных напряжений. В разработанном программном продукте «Seis-ASZ» величины компонент тензора вычисляются с использованием значений смещений (деформаций) поверхности Земли. Для получения смещений в программе реализован полноценный алгоритм расчета гравитационного потенциала, вызываемого взаимодействием Солнца, Земли и Луны, и, соответственно, вызываемых за счет него смещений поверхности. Алгоритм реализован на аналитических соотношениях, полученных в работах [9, 11]. Эти же определяющие соотношения используются во всех программах расчета приливных волн, поэтому сравнительный анализ результатов работы данного модуля (расчет смещений) комплекса «Seis-ASZ» и результатов программы ERTID [8] дал хорошую сходимость. В модуле, где вычисляется непосредственно параметр LURR, для выделения нагрузочных и разгрузочных циклов используется критерий Кулона – Мора (4).

$$\sigma_{11} = (2 \cdot G / (1 - \nu)) \cdot (\varepsilon_{11} + \nu \cdot (\varepsilon_{22} - \nu \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}))), \quad (1)$$

$$\sigma_{22} = (2 \cdot G / (1 - \nu)) \cdot (\varepsilon_{22} + \nu \cdot (\varepsilon_{11} - \nu \cdot (\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}))), \quad (2)$$

$$\tau_{12} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{12}, \quad (3)$$

$$\tau_f = \tau_{12} + \sigma_{22} \cdot f. \quad (4)$$

Здесь  $\tau$  – касательное напряжение,  $\sigma$  – нормальное напряжение на произвольной площадке, проходящей через рассматриваемый элемент геосреды,  $G$  и  $\nu$  – соответственно модули сдвига и Пуассона, а  $f$  – коэффициент внутреннего трения. В алгоритме применяются три константы со следующими значениями  $G = 3 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu = 0,25$ ,  $f = 0,6$ . Огибающая уравнения (4) есть поверхность, определяющая напряженно-деформированное состояние. Часто левую часть данного уравнения называют эффективным касательным напряжением. Нагружение среды определяется возрастанием  $\tau_f$ , а разгрузка уменьшением.

В оригинальной работе [13] для расчета  $g$  использовалась так называемая деформация Беньюффа (корень из сейсмической энергии):

$$B(t) = 1,41 \cdot 10^{5,5 - 4mag(t)}, \quad (5)$$

$$\gamma(t, w) = \left| \frac{\sum_{t-w/2}^{t+w/2} B_+(t)}{\sum_{t-w/2}^{t+w/2} B_-(t)} \right|, \quad (6)$$

где  $t$  – время, а  $w$  – величина скользящего окна.

Так как в работе [12] нет убедительного обоснования, почему используется именно эта характеристика, то для улучшения контроля расчетов были предложены еще два параметра: первый – это просто магнитуа события, а второй – количество событий.

Так, например, для количества событий  $\gamma$  рассчитывается следующим образом:

$$\gamma(t, w) = \left| \frac{\sum_{t-w/2}^{t+w/2} N_+(t)}{\sum_{t-w/2}^{t+w/2} N_-(t)} \right|, \quad (7)$$

где  $t$  – время, а  $w$  – величина скользящего окна.

Второй очень важный аспект – это математическая обработка данных, то есть значения  $\delta t$  (шаг или сдвиг) и  $w$ . В работе [12] эти параметры брались в соотношении 60/240 и 60/360. В этом случае даже при окне в 240 дней задержка прогнозируемого события не может быть меньше половины окна, то есть 4 месяцев. Поэтому в программе все параметры математической обработки не привязаны к оригинальным значениям и могут изменяться (что и было использовано при расчетах). В работе использован каталог землетрясений для южной части Сахалина, предоставленный СФ ГС РАН [3], и его северной части [12].

Программный комплекс «Seis-ASZ» выполнен на языке программирования C++ в языковой среде C++ Builder 6.0. «Seis-ASZ» реализован отдельными модулями и кроме основной задачи по построению кривых LURR также представлен широким инструментарием для работы с каталогами сейсмических событий. К методике также относится конкретизация формы выходных данных (результатов анализа в типовых случаях). Эта информация определяет требования к проектируемому специализированному ПО.

## 2. Специализированный комплекс «Seis-ASZ»: структура, назначение, опции

**Входные данные.** Основным требованием к разрабатываемому программному обеспечению является возможность анализа сейсмологических данных. К сейсмологическим данным относится каталог сейсмических событий, который содержит следующие характеристики по каждому сейсмическому событию: время, место и энергия события.

Таким образом, входными данными ПО «Seis-ASZ» является каталог сейсмических событий. Формат файла: ASCII с 10 позициями (год, месяц, день, час, минута, секунда, широта, долгота, магнитуда, глубина), разделенными знаками табуляции.

**Выходные данные.** В качестве результата анализа вариаций LURR в потоке сейсмических событий могут выступать 3 типа данных: таблицы, графики и текстовые файлы. Для каждого типа выходных данных предусмотрена возможность сохранения в файл стандартного формата для дальнейшего использования. Все типы выходных данных могут быть получены при обработке и визуализации исследуемых потоков. До анализа данных исследователь может просмотреть непосредственно сам каталог, получить общую статистику по нему, а также воспользоваться инструментами для получения модифицированных каталогов. Модификации представляют собой результаты сепарации событий по одному из ключевых признаков: пространственному (эпицентр и гипоцентр), временному (время события) и энергетическому (магнитуда). Сам анализ представлен отдельными модулями, которые можно использовать в любой последовательности. Результаты вычислений визуализи-

руются, а также записываются в текстовом формате во временные файлы. Графики можно масштабировать, а также сохранять в пользовательскую папку после их отображения на экране нажатием соответствующей клавиши. Данные расчетов можно сохранить в пользовательском каталоге в любое время.

**Назначение и условия применения.** Разработанное ПО «Seis-ASZ» предназначено для анализа вариаций LURR, сейсмической активности, суточных вариаций в потоке сейсмических событий.

Модульная структура «Seis-ASZ» показана на рис. 1.

Программа позволяет:

1. Считывать данные из каталогов сейсмических событий.
2. Формировать из загруженного каталога новые каталоги методом сепарации по одному из ключевых признаков.
3. Выполнять следующие функции:
  - Получение общей информации по каталогу (краевые значения по характеристикам каталога: время, место и энергия).
  - Производить селективный отбор событий по ключевым параметрам и формировать модернизированные каталоги.



Рис. 1. Модульная структура комплекса «Seis-ASZ»

- Проводить расчет гравитационного потенциала и формируемые им приливные деформации в заданной точке планеты в любой момент времени.
- Проводить расчет компонент тензора напряжений в системе  $n-s, e-w, z$  по полученным смещениям и деформациям. Получить компоненты тензора в осях, которые согласованы с нодальной плоскостью очага так, что касательные напряжения лежат в плоскости слип-вектора.
- Проводить расчет параметра LURR по методу [14].
- Графически отображать полученные результаты и формировать текстовые файлы с выходными данными.
- Проводить построение параметра LURR в активном режиме (выводить графики не сразу, а по отдельным точкам с паузами). В данном режиме производить отображение сейсмических событий «разного знака» в отдельных окнах и подавать сигналы о превышении некоторого заданного порога параметра и появлении в потоке событий заданной магнитуды.
- Производить расчет сейсмической активности, суточных распределений сейсмических событий, почасовых распределений.

Наличие справки значительно облегчает процесс изучения функций программы.

**Общие сведения об интерфейсе.** Интерфейс «Seis-ASZ» максимально удобен и понятен для пользователя (рис. 2).

**Пункт меню «Файл».** Данный пункт позволяет пользователю открывать файлы (каталоги) сейсмических событий, а также сохранять или загружать данные расчетов проведенных ранее. Требования к входным файлам описаны в Справке программы.

**Выбрать каталог событий.** Этот пункт позволяет пользователю открыть окно диалога для выбора входного файла, содержащего информацию о землетрясениях. После выбора файла входные данные предоставляются пользователю в табличном виде в случае, если файл имеет формат, соответствующий требованиям.

**Пункт меню «Инструменты».**

**Оптимизировать каталог.** Позволяет перейти в форму оптимизации.

**Просмотреть загруженный каталог.** Предлагает для просмотра загруженный каталог.

**Пункт меню «Справка»** содержит руководство по использованию программы, а также материалы по методу исследований.

Слева на основной форме расположена панель для настройки параметров расчета, управления

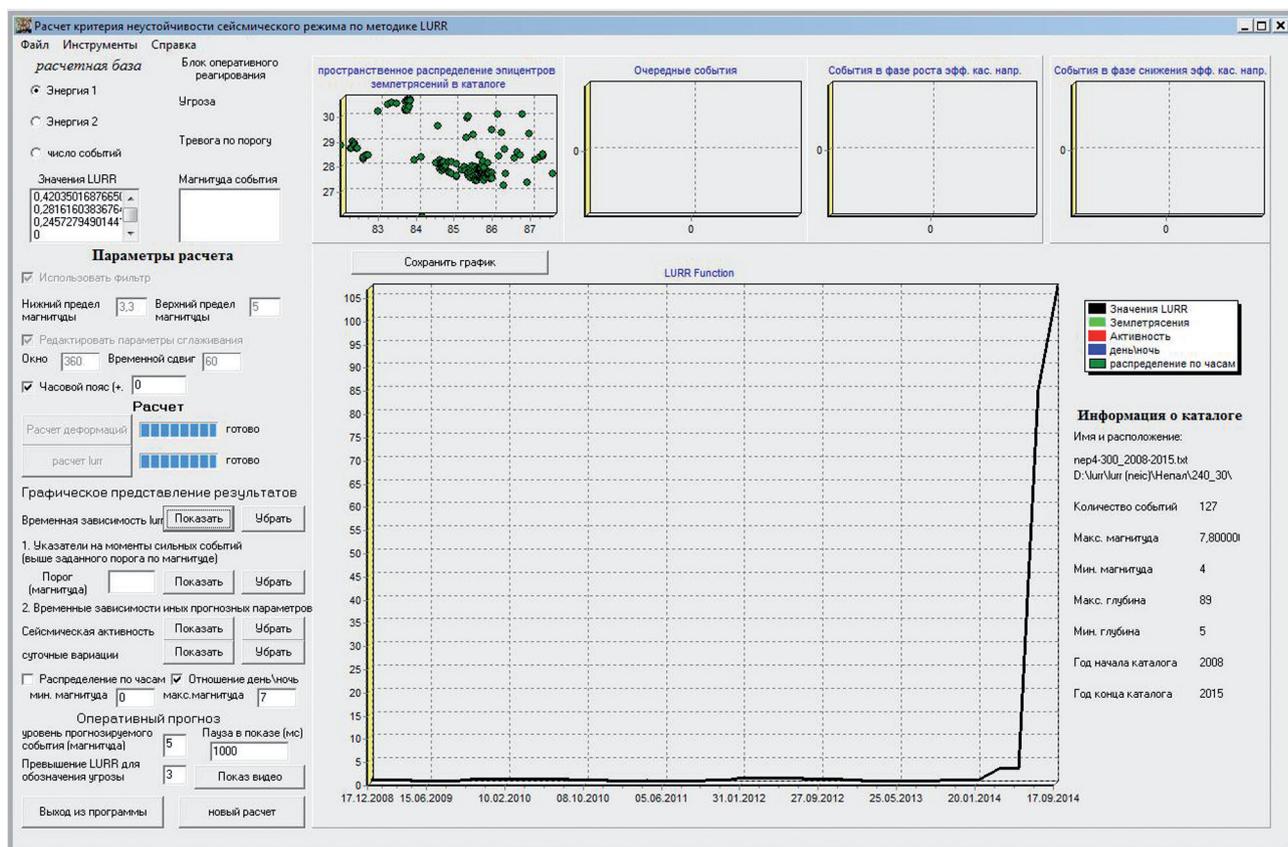


Рис. 2. Скриншот «Seis-ASZ». Интерфейс программы

процессом расчета в отдельных модулях, а также графическим представлением полученных результатов. Панель содержит 3 раздела: «Параметры расчета LURR», «Графическое представление результатов», «Отслеживание предвестника».

Рассмотрим их по отдельности.

1. *Параметры расчета LURR.* Одним из определяющих параметров является «расчетная база». Наряду с единственным вариантом, предложенным в работе [13] – деформации Беньоффа (Энергия 1), предложен статистический параметр – количество событий, а также еще один энергетический параметр расчета по магнитуде (Энергия 2). Выбирается только один вариант. Далее пользователь может указать на «cut off» событий по магнитуде (согласно методике [13] конкретные значения для каждого региона подбираются в процессе моделирования) и выбрать значения. Необходимо указать параметры сглаживания. Часовой пояс требуется для расчета суточных распределений – отдельный от LURR параметр и при расчете LURR не используется. Если параметры не изменены пользователем, то они принимают значения «по умолчанию». Здесь же располагаются две кнопки по инициализации последовательно активируемых расчетов деформаций и LURR. Раздел графического представления становится доступен после завершения указанных расчетов.
2. *Графическое представление результатов.* Временная зависимость LURR, сейсмическая активность и суточные распределения можно вынести в графическую область в любом порядке. Для удобства возможно указание на графике в виде вертикальных баров позиций сильных событий, превышающих порог (задается в том же разделе). Суточные распределения строятся в двух видах: гистограмма распределений событий по суточным часам и отношение сейсмичности в дневное время к ночному. Второй график можно ассоциировать с другими графическими результатами, так как они все строятся в одном окне сглаживания, а гистограмму можно просмотреть отдельно.
3. *Отслеживание предвестника.* Здесь задаются три параметра: порог параметра LURR, порог по магнитуде для прогнозируемого события и задержка для вывода точек на экран и появления предупреждений и оповещений. Кнопка «захват» предлагает начать просмотр. В верхней части основной формы расположен блок оперативного реагирования и 4 графика. В блоке оперативного реагирования

выводятся ключевые сообщения о превышении параметром критического уровня (порога) и появления в потоке события по уровню выше заданной магнитуды. Здесь же указывается магнитуда указанного события. На 4 графиках в верхней части окна отражаются события в пространстве: полный каталог, в текущем временном окне, в текущем окне по положительной фазе и в текущем окне по отрицательной фазе.

В правой части окна интерфейса программы при загрузке файла пользователю доступна общая информация по каталогу: начальная и конечная даты, максимальный и минимальный класс, максимальная и минимальная глубина, количество событий.

### Результаты

Рассмотрим карту района, для которого будем проводить расчеты (рис. 3). Итак, это южная часть острова Сахалин, на территории которого с начала 2000-х годов (период, когда в регионе начала работу региональная сейсмическая сеть) произошло всего лишь 3 землетрясения магнитудой больше 5. Среди этих трех событий, вне всякого сомнения, наибольший интерес представляет Невельское землетрясение (2 августа 2007 года,  $M_w = 6,2$ ). На рис. 3 показана карта распределения эпицентров землетрясений в период с 2004 по 2008.

Согласно методу LURR [13], для анализа необходимо выбрать область ограниченную квадратом (или кругом) стороной (или радиусом) в 100-150 км. Так как вся область южной части Сахалина лишь незначительно превышает эти значения в обоих направлениях (С-Ю, В-З), то можно использовать данные каталога в исходном виде.

В тоже время для чистоты эксперимента возьмем круговую область с центром в эпицентре Невельского землетрясения и радиусом в 100 км и для сравнения с ней такой же круг находящийся восточнее первого (рис. 3). Результаты работы комплекса «Seis-ASZ» с данными для южного Сахалина представлены на рис. 4-7 и северного Сахалина на рис. 8. Параметры для математической обработки были взяты из оригинальной работы [13], то есть: окно – 240 или 360 дней, сдвиг (шаг) – 60 дней, магнитуды (cut off) от 3,3 до 5. Результаты обработки полного каталога и двух круговых зон (вырожденные в эллипсы) показаны на рис. 4, 5, 6 соответственно. На рис. 7 показан пример обработки на меньших значениях скользящего окна и временного сдвига. Очевидно, что выделение зоны, в которой произошло прогнозируемое событие (рис. 5, круг А), значительно улучшает результат прогноза, что мы и наблюдаем на рис. 7. Интересно, что в зоне Б, которая не включает

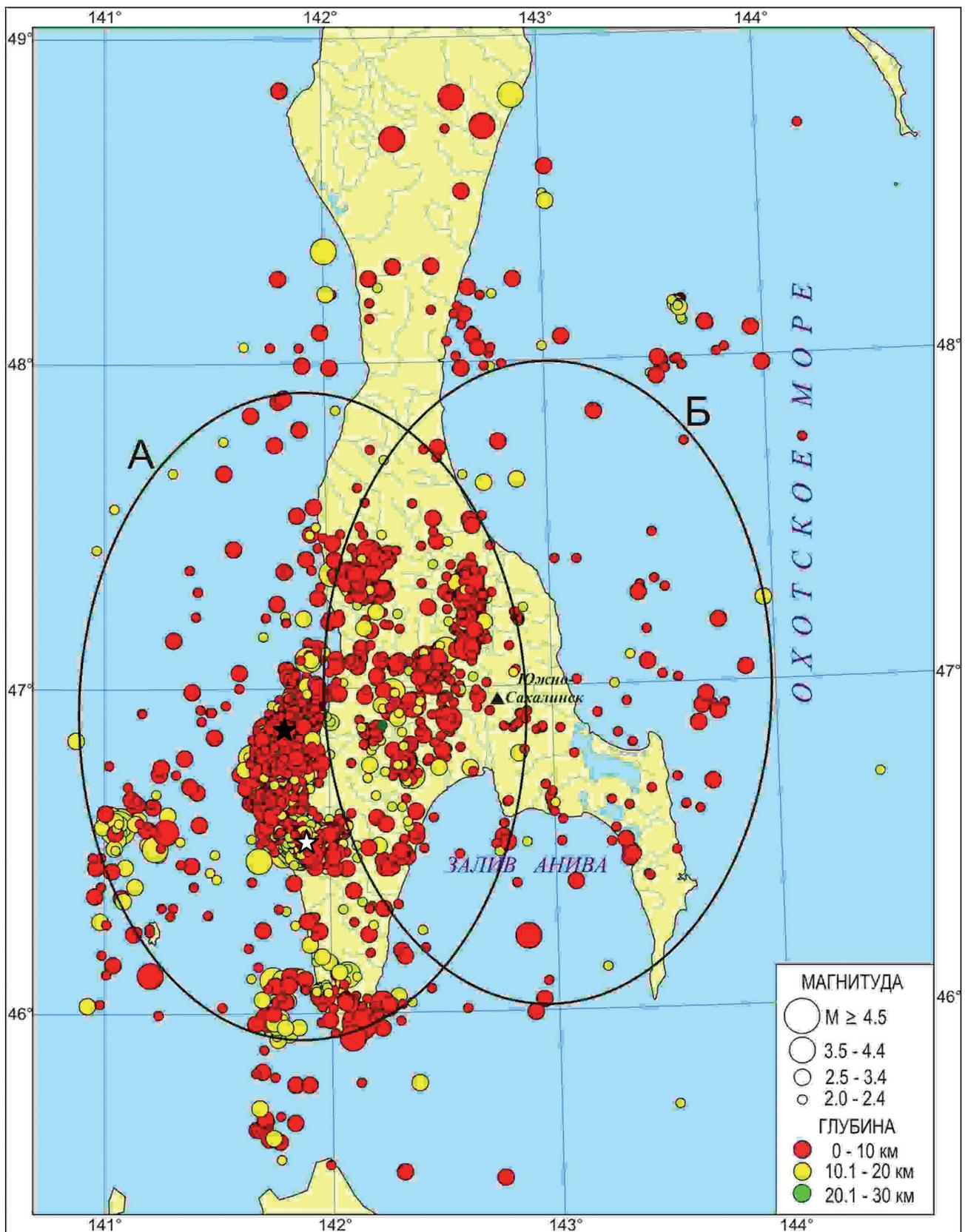


Рис. 3. Карта южной части о. Сахалин.  
 Обозначения: черная звездочка – Невельское землетрясение, белая – Горнозаводское

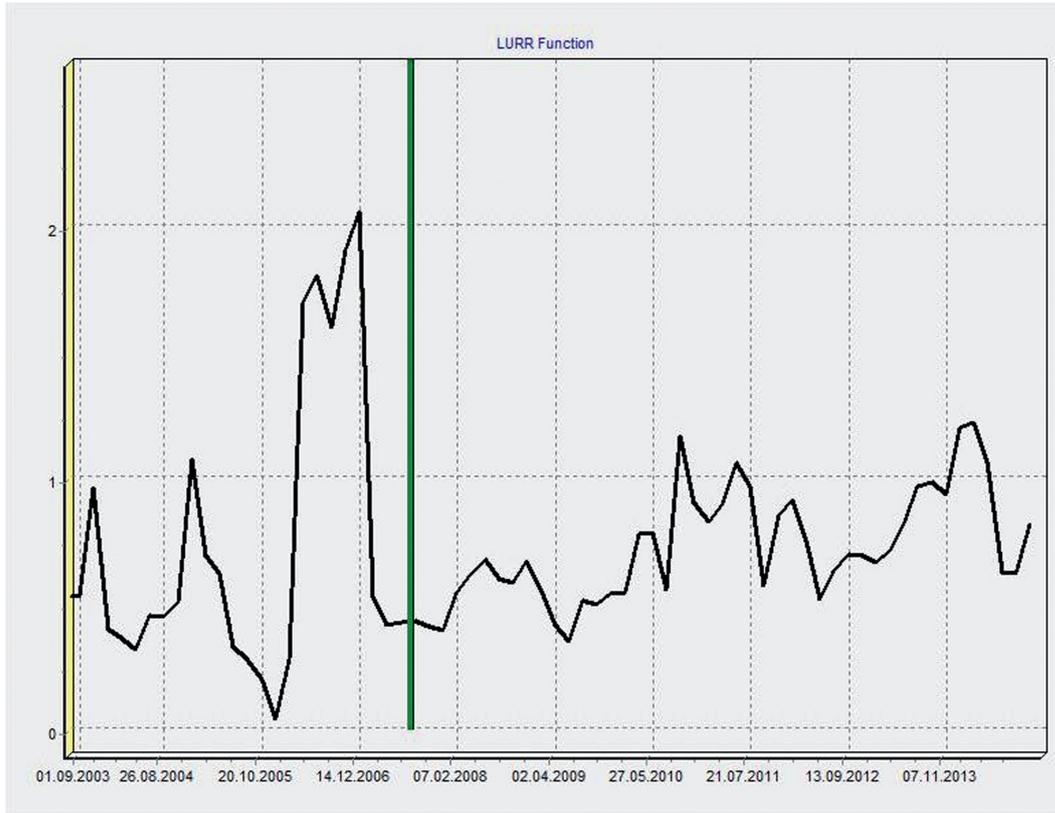


Рис. 4. Скриншот «Seis-ASZ». LURR – функция для Южного Сахалина в период с 2003 по 2015 гг. Параметры расчета: окно 240 дней, сдвиг 60 дней, диапазон магнитуд от 3,3 до 5. Прямоугольным баром отмечено Невельское землетрясение

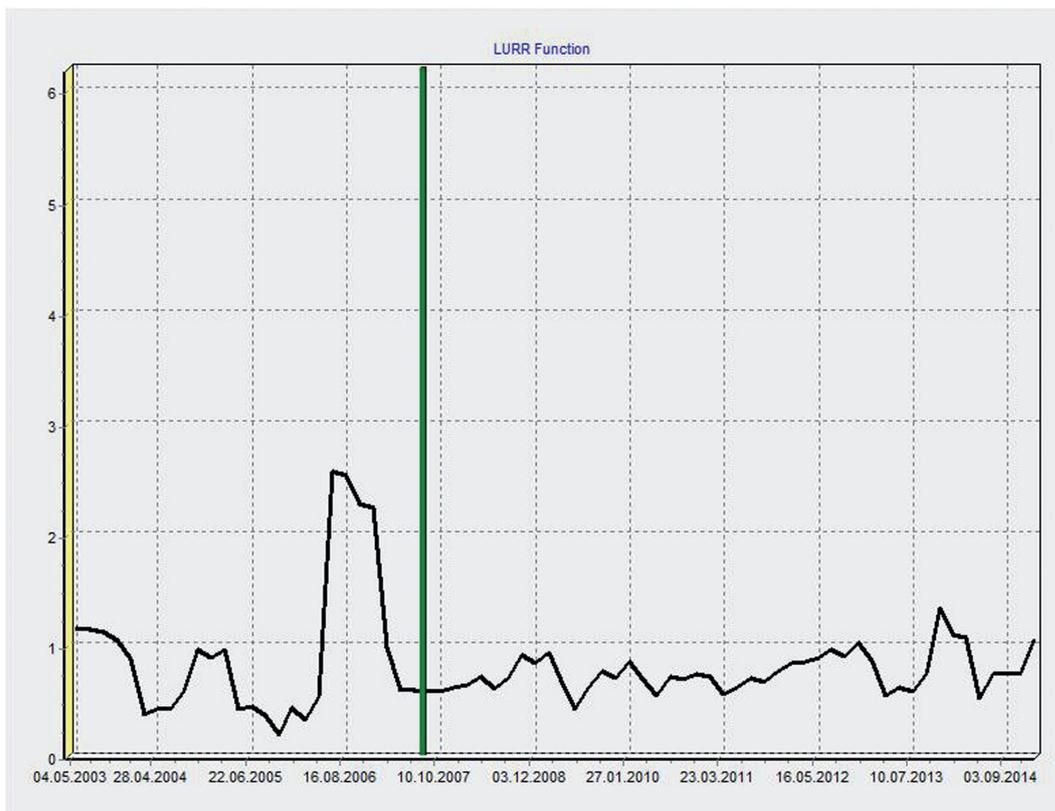


Рис. 5. Скриншот «Seis-ASZ». LURR – функция для Южного Сахалина в период с 2003 по 2015 гг. (в расчете использованы события принадлежащие круговой области A). Параметры расчета: окно 240 дней, сдвиг 60 дней, диапазон магнитуд от 3,3 до 5. Прямоугольным баром отмечено Невельское землетрясение

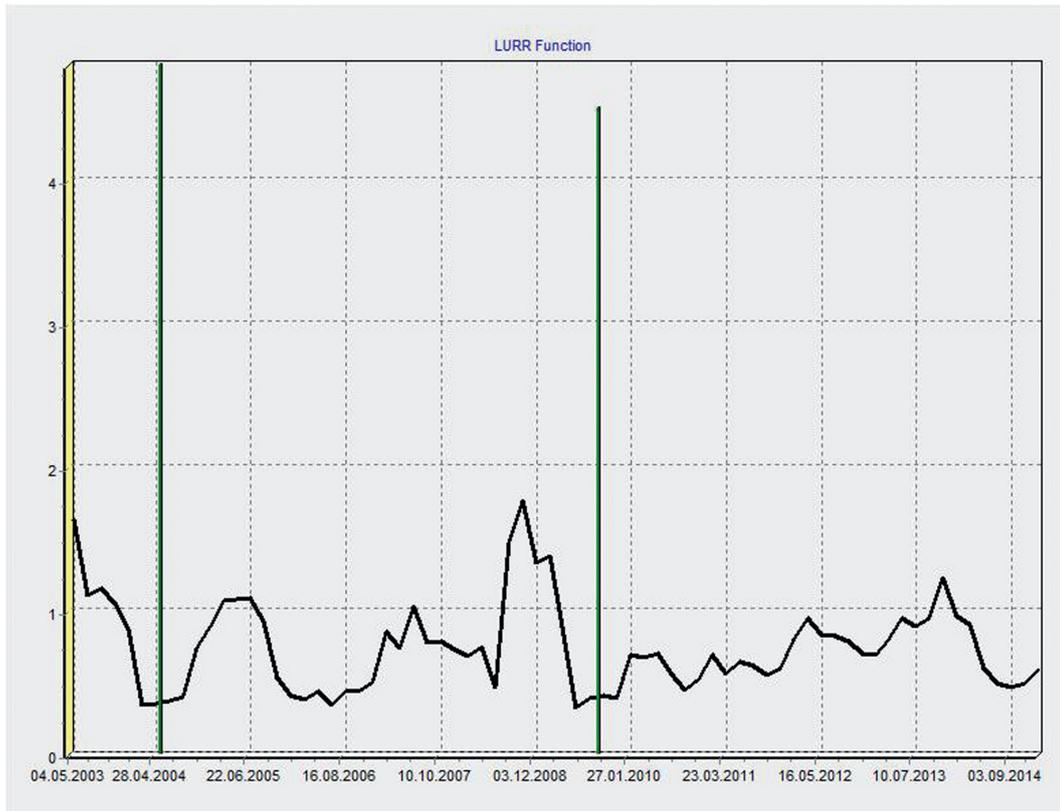


Рис. 6. Скриншот «Seis-ASZ». LURR – функция для Южного Сахалина в период с 2003 по 2015 гг. (в расчете использованы события принадлежащие круговой области Б).  
 Параметры расчета: окно 240 дней, сдвиг 60 дней, диапазон магнитуд от 3,3 до 5.  
 Прямоугольным баром отмечены землетрясения магнитудой выше 4,5

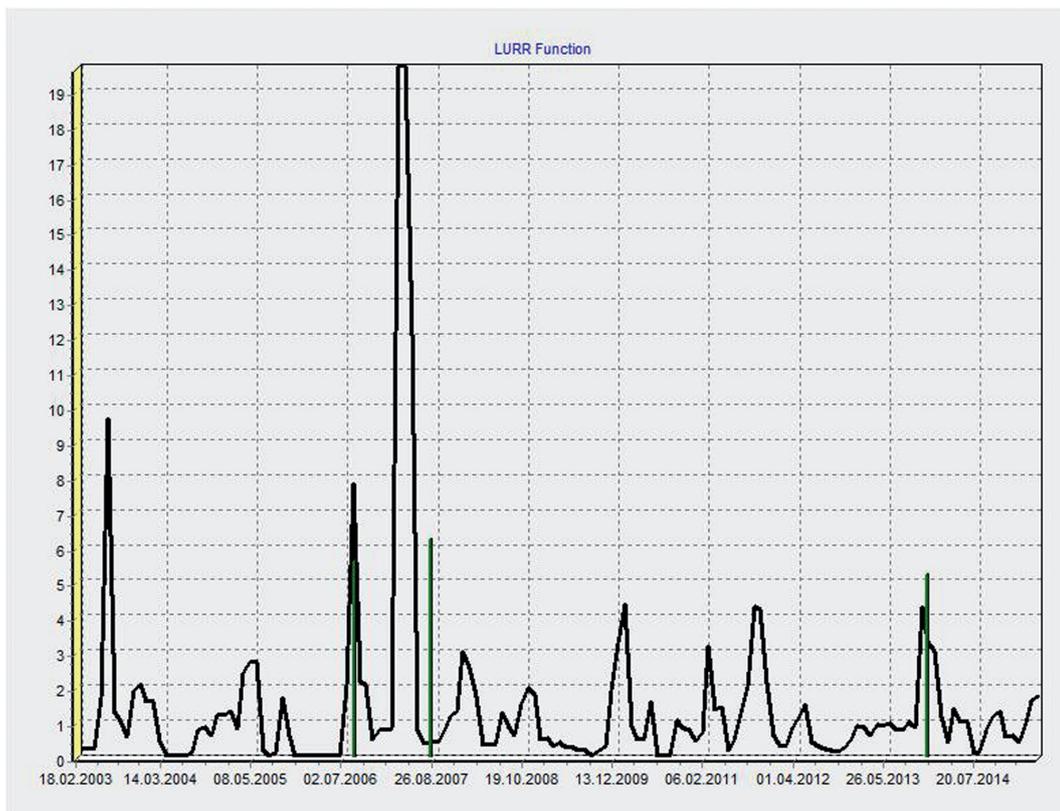


Рис. 7. Скриншот «Seis-ASZ». LURR – функция для Южного Сахалина в период с 2003 по 2015 гг.  
 Параметры расчета: окно 90 дней, сдвиг 30 дней, диапазон магнитуд от 3,3 до 5.  
 Прямоугольным баром отмечены землетрясения магнитудой выше 5

территорию, на которой произошло Невельское землетрясение, нет и предвестника по данному событию (рис. 6), однако есть две небольшие вариации, которые предшествуют двум самым сильным событиям (магнитуды 4,5 и 4,7) этой зоны. По имеющемуся опыту должно отметить, что выделение отдельных предвестников для событий магнитудой меньше 5, как правило, сложная задача, и подобный результат (рис. 6) не есть правило, скорее исключение. В целом при использовании данных полного каталога мы получаем не сильно отличную картину (рис. 4) от выделенной эпицентральной зоны (рис. 5) по значениям LURR-функции, а потому делаем вывод о том, что процесс подготовки события в Невельске для Южного Сахалина в рассматриваемый период является преобладающим над всеми остальными. Теперь рассмотрим результат, показанный на рис. 4 более подробно. Первая точка со значением большим единицы (превышающим  $3\sigma$ ) датирована 17.06.2006, то есть почти за год до Невельского землетрясения, а возврат функции к значению близкому 1 состоялся в феврале 2007. Таким образом, получен приемлемый результат – за 1 год объявляется тревога, а отсчет времени до события начинается за полгода до него. Но в эту концепцию плохо встраивается то, что в период подготовки события (с июня 2006 по февраль 2007) недалеко от эпицентра будущего землетрясения произошло еще одно событие, причем второе по магнитуде после Невельского! Горнозаводское землетрясение произошло 17.08.2006, вызвало много афтершоковых событий, а его магнитуда составила 5,6. Если считать это землетрясение и последовавшие за ним события частью подготовки Невельского, то результат нас устраивает, а если это разные процессы, то как их разделить? Решение данной проблемы только в уменьшении значения скользящего окна (чтобы два временных процесса не накладывались друг на друга, нужно уменьшить его с 240 дней минимум до 120, то есть сделать меньше полугода), а также в увеличении количества точек графика (уменьшение шага). Очевидно, что при уменьшении величины скользящего окна возрастет количество вариаций, но это не страшно, так как, имея в наличии основной расчет на большом окне, мы всего лишь детализуем главную вариацию, остальные просто не принимаются в расчет. На рис. 7 показан результат работы программы с заданными параметрами: окно 90 дней, сдвиг 30 дней. Первоначальные сомнения подтвердились – все-таки Горнозаводское землетрясение внесло свои коррективы и отразилось на «Невельской» вариации, которая начинается много позже, 27 февраля 2007 произошло только первое превышение порога, а возврат к 1 произошел в конце мая 2007 года.

Таким образом, по этим данным (рис. 7) за 5 месяцев до Невельского события могла бы быть объявлена тревога, а обратный отсчет начат за два месяца до него. Несмотря на то, что мы улучшили параметры прогноза, их использование возможно только в дополнение к основному расчету, то есть после определения главной (искомой) вариации, в противном случае дать объяснение всем многочисленным вариациям не представляется возможным.

Особый интерес представляет прогноз сейсмической опасности в северной части острова Сахалин, где в последние годы активно идет работа по освоению шельфовых нефтегазовых месторождений. Для анализа был использован более детальный каталог локальной сейсмологической сети [12], который стал доступен с 2006 года. Карту для северной части приводить не будем, с основными характеристиками сейсмичности северного Сахалина можно ознакомиться в [12]. Результат обработки показан на рис. 8.

В период с 2006 по 2015 гг. в северной части острова было лишь одно землетрясение с магнитудой выше 5 (16.03.2010,  $M = 5,6$ ), оно и указано на скриншоте программы. Как мы видим, ему соответствует вариация по уровню близкая той, что мы видели на рис. 4 перед Невельским событием. Однако привлекает внимание не столько удачная реализация прогноза и для северной части Сахалина, сколько наличие только что сформировавшейся вариации, то есть имеющийся текущий прогноз. Отсчет времени по возврату данной вариации к значениям близким 1 начинается с ноября 2014 года и на момент написания данной статьи составляет почти 1 год. Если ориентироваться на оригинальные работы, где задержки указаны до двух лет, то опасность в северной части Сахалина будет сохраняться до октября-ноября 2016 года. Если учитывать, что уровень вариации в 2,5 раза выше, чем у первой, то ожидаемое событие может быть сильнее, чем в 2010 году. Впрочем, для получения данных о связи магнитуды ожидаемого события с уровнем вариации LURR существующих данных явно недостаточно.

### Заключение

Разработанная специализированная программа «Seis-ASZ» позволяет быстро и эффективно проводить расчет распределений потоков сейсмических событий, получать различные статистические характеристики и визуализировать результаты расчета. Программный комплекс «Seis-ASZ» может применяться для анализа любых сейсмических потоков, полученных по данным сейсмических наблюдений. При использовании «Seis-ASZ» для анализа каталогов Сахалина, представленного данными региональной сети СФ ГС РАН и сейсмической сети [12],

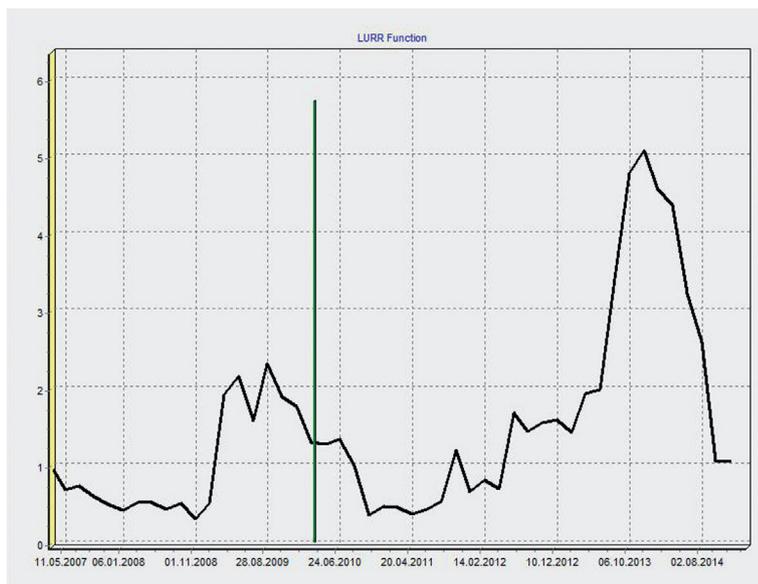


Рис. 8. Скриншот «Seis-ASZ». LURR – функция для Северного Сахалина в период с 2007 по 2015 гг. Параметры расчета: окно 360 дней, сдвиг 60 дней, диапазон магнитуд от 3,3 до 5. Прямоугольным баром отмечены землетрясения магнитудой выше 5

продемонстрирована возможность прогноза сильных сейсмических событий в реальном времени с задержками от нескольких месяцев.

Автор выражает признательность зав. лаб. сейсмологии ИМГиГ ДВО РАН Тихонову И.Н. и зав. лаб. физики землетрясений ИМГиГ ДВО РАН Коновалову А.В. за предоставленные каталоги землетрясений по Южному и Северному Сахалину соответственно.

**Ключевые слова:** сейсмическое событие, каталог, прогноз

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). – М. : ИНЭК, 2005. – 252 с.
2. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 3-15.
3. Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций) / Ч.У. Ким, Е.П. Семенова, О.А. Жердева, Сен Рак Се, В.И. Михайлов, Ю.Н. Левин, И.С. Паршина, Н.А. Урбан, М. Касахара, М. Ичиянаги, Х. Такахаша. – Владивосток : Дальнаука, 2011. – 357 с.
4. Наведенная сейсмичность : сб. науч. тр. / отв. ред. А.В. Николаев, И.Н. Галкин. – М. : Наука, 1994. – 222 с.
5. Николаев Н.И. О состоянии изучения проблемы землетрясений, связанных с инженерной деятельностью // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. – М. : Наука, 1977. – С. 8-21.
6. Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. – 1998. – № 7. – С. 85-90.

7. Beeler N.M., Lockner D.A. Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence // J. Geophys. Res. – 2003. – 108(B8). – 2391.
8. Berger J., Farrell W., Harrison J.C., Levine J., Agnew D.C. ERTID 1: A program for calculation of solid Earth tides. – Publication of the Scripps Institution of Oceanography, 1987.
9. Cartwright D.E., Tayler R.J. New computations of the tide-generating potential // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. – 1971. – 23. – С. 45-73.
10. Lockner D.A., Beeler N.M. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes // J. Geophys. Res. – 1999. – 104. 20. – 133-20151.
11. Munk W.H., Cartwright D.E. Tidal Spectroscopy and Prediction // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. – 1966. – 259. – P. 533-581.
12. Stepanov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemoller L. New Architecture of an Automated System for Acquisition, Storage, and Processing of Seismic Data // Seismic Instruments. – 2014. – Vol. 50. – No. 1. – P. 67-74.
13. Yin X.C. et all. A new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory // Pure Appl. Geophys. – 1995.– 145, No. 3/4. – P. 701-715.
14. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory // Pure Appl. Geophys. – 157 No. 11/12. – 2001. – P. 2365-2383.
15. Yangde Feng, Guoliang Ji and Wenkai Cui. Parallel Computing for LURR of Earthquake Prediction // International Journal of Geophysics. – 2012 – Vol. 2012. – Article ID 567293. – 3 pages.