

УДК 025.4.03:550.348.425(571.53/.55)

© М.А. Хритова, Н.А. Гилева



Введение

Сейсмический мониторинг является неотъемлемой частью жизнеобеспечения населения регионов с выраженной сейсмической активностью, систем обеспечения безопасности ответственных сооружений (в частности, атомных электростанций, скважин, шахт, мостов и др.). Мониторинг включает не только регистрацию, но и дальнейшую оперативную обработку и интерпретацию сейсмологических данных. Соединенные со средствами коммуникаций, системы мониторинга позволяют осуществлять уведомление населения и официальных лиц о происходящих землетрясениях или других сейсмических событиях.

Автоматический мониторинг сейсмичности в режиме реального времени является не только важнейшей, но и одновременно сложнейшей задачей сейсмологической практики. Его важность определяется необходимостью принятия экстренных мер и исполнения оперативных мероприятий в зависимости от текущей сейсмической обстановки.

Оперативный мониторинг землетрясений на территории Прибайкалья осуществляется на базе региональной сейсмической сети ВУКЛ Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН (БФ ГС СО РАН), включающей, по состоянию на октябрь 2012 г., 25 сейсмических станций (рис. 1) [1].

На всех сейсмических станциях БФ ГС СО РАН ведется непрерывная цифровая регистрация. Цифровые сейсмические станции имеют три короткопериодных сейсмометрических канала повышенной чувствительности (N-S, E-W, Z), регистрирующие скорости смещения почвы, и три грубых канала (NSg, EWg, Zg), регистрирующие ускорения грунта. Частота дискретизации поступающих данных – 100 Гц [2].

В данной статье рассмотрена разработанная авторами информационная система мониторинга сейсмичности Прибайкалья в режиме реального времени или близком к реальному.

Цель работы заключалась в создании интегрированной информационной системы, адаптированной к конкретной конфигурации сети сейсмических станций БФ ГС СО РАН, позволяющей автоматиче-

чески получать первичные материалы наблюдений (цифровые записи волновых форм землетрясений), автоматически определять основные параметры событий, предоставлять исследователю наглядную информацию о произошедшем событиях, и в применении этой системы для мониторинга сейсмичности Прибайкалья и Забайкалья.

Мониторинг сейсмичности региона включает процессы: регистрацию события цифровыми сейсмическими станциями, передачу первичных материалов наблюдения с сейсмостанций в центр сбора информации (ЦСИ), анализ поступающих данных в ЦСИ, автоматическую обработку региональных землетрясений, оповещение заинтересованных ведомств и организаций о произошедших сильных землетрясениях и их возможных последствиях [3]. На рис. 2 представлена функциональная модель сейсмического мониторинга, проводимого в автоматическом режиме на территории Прибайкалья.

Для осуществления мониторинга сейсмичности в режиме реального времени необходимо соответствующее программное решение, состоящее из системы сбора первичных материалов наблюдения с сети станций в режиме реального времени, модуля анализа и интерпретации поступающих данных и программы автоматической обработки региональных землетрясений.

Система сбора первичных материалов наблюдения с сети сейсмических станций в режиме реального времени

Для передачи данных в центр сбора информации на большинстве станций используются GPRS модемы. Плохая скорость передачи данных и большая стоимость интернет-трафика не позволяют передавать непрерывные цифровые записи с сейсмостанций в ЦСИ. Поэтому в Байкальском филиале ГС СО РАН был разработан программный комплекс «Send_Agent & Receive_Agent» для автоматической передачи фрагментов записей волновых форм землетрясений средствами Интернет с сети станций в ЦСИ в режиме времени, близком к реальному [4].

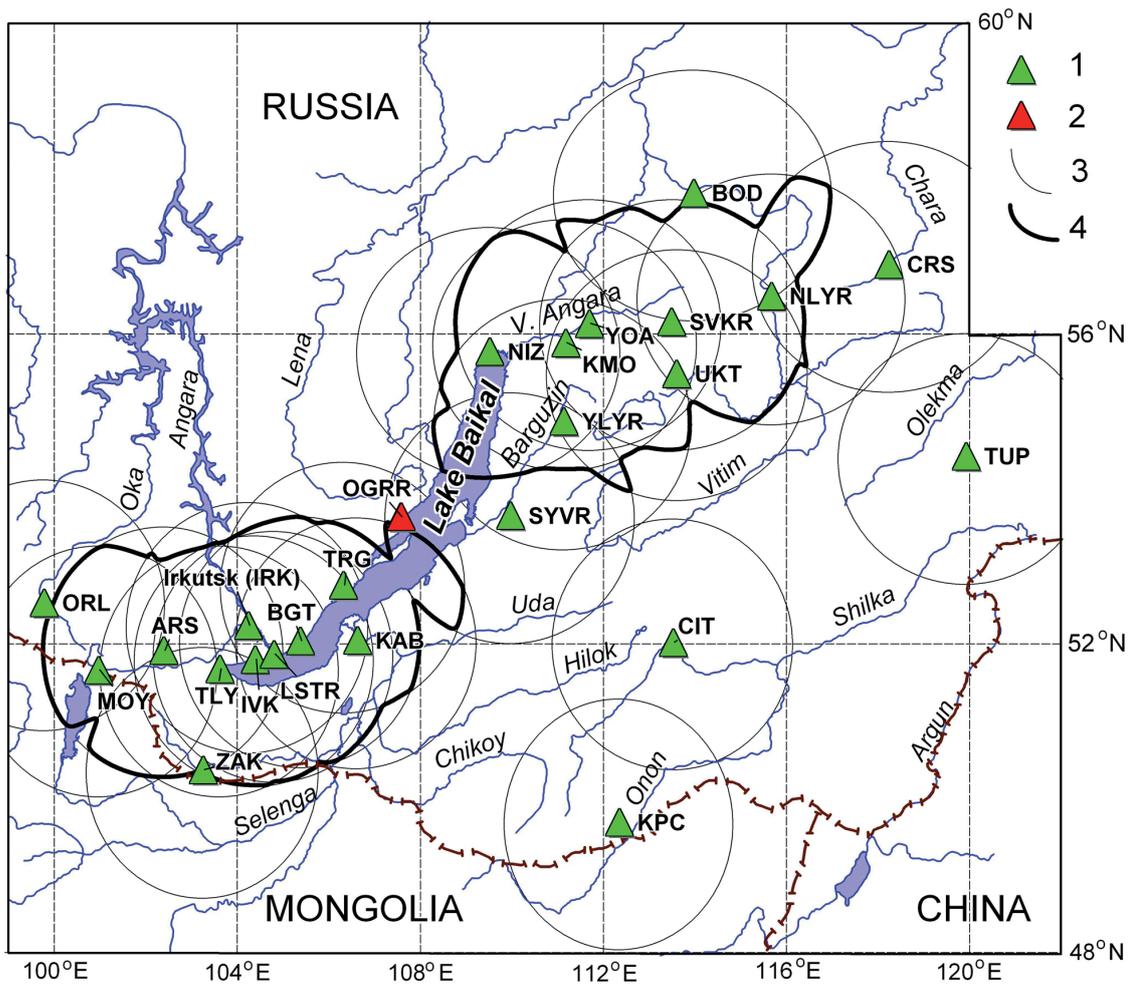


Рис. 1. Схема расположения сейсмостанций в Прибайкалье и Забайкалье: 1, 2 – сейсмостанции Байкальского филиала ГС СО РАН, имеющие выход в Интернет (1) и не имеющие выхода в Интернет (2); 3 – окружности радиусом 180 км вокруг сейсмических станций; 4 – контур, ограничивающий зоны, в пределах которых располагается не менее трех сейсмических станций с выходом в Интернет

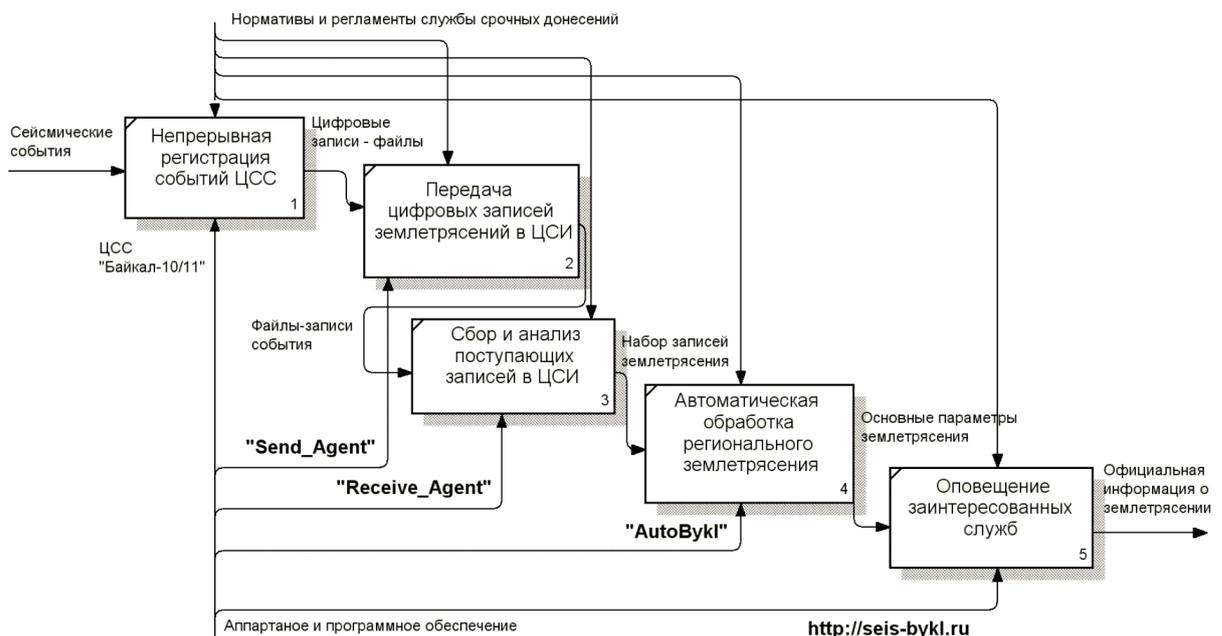


Рис. 2. Функциональная схема автоматического мониторинга сейсмичности Прибайкалья и Забайкалья

Процесс автоматической передачи фрагментов записей волновых форм землетрясений с сейсмостанции в ЦСИ осуществляется под управлением программы «Send_Agent», выполняющей следующие функции (рис. 3):

1. Постоянное слежение за появлением файлов, содержащих волновые формы события (резидентное приложение). Если при регистрации волновых форм происходит превышение заданного установленного критерия по амплитудам колебаний, то программа регистрации посылает команду для активизации модуля «Send_Agent».
2. Выбор волновых форм, превышающих заданный критерий по амплитудам колебаний. Вырезание фрагмента записи волновых форм из файлов с сохранением исходного формата.
3. Сжатие полученных фрагментов волновых форм выбранных файлов. Применение стандартных методов сжатия позволяет уменьшить объем передаваемых данных практически в два раза.
4. Формирование электронного письма, содержащего пересылаемые файлы. Передача данных осуществляется с помощью почтового протокола SMTP по нескольким адресатам для дублирования данных.
5. Подключение и разъединение удаленного интернет-соединения. Большинство станций используют модемы типа Dial-up (удаленное соединение), поэтому в системе предусмотре-

на возможность автоматического подключения и разъединения интернет-соединения.

6. Отправка сформированных файлов при использовании протокола SMTP, то есть сохранение их на почтовом сервере с указанными атрибутами.
7. Уведомление пользователя о производимых действиях: формируется реестр, в котором отражается информация о дате и времени осуществления отправки файлов, полные имена файлов.

Фрагменты записей, отправленные с сейсмостанций с помощью программы «Send_Agent», поступают в центр сбора информации. Для их регистрации и анализа разработан модуль «Receive_Agent».

Приложение для автоматической регистрации волновых форм землетрясений в центре сбора информации удовлетворяет следующим функциональным требованиям:

1. Постоянное слежение за появлением на почтовом сервере файлов, отправленных с помощью «Send_Agent» с сейсмостанций (резидентное приложение).
2. При наличии на сервере нужных писем, получение и сохранение их на рабочей машине в центре сбора информации.
3. Разархивирование и классификация полученных файлов, сохранение в определенных директориях для удобства проведения последующей обработки.

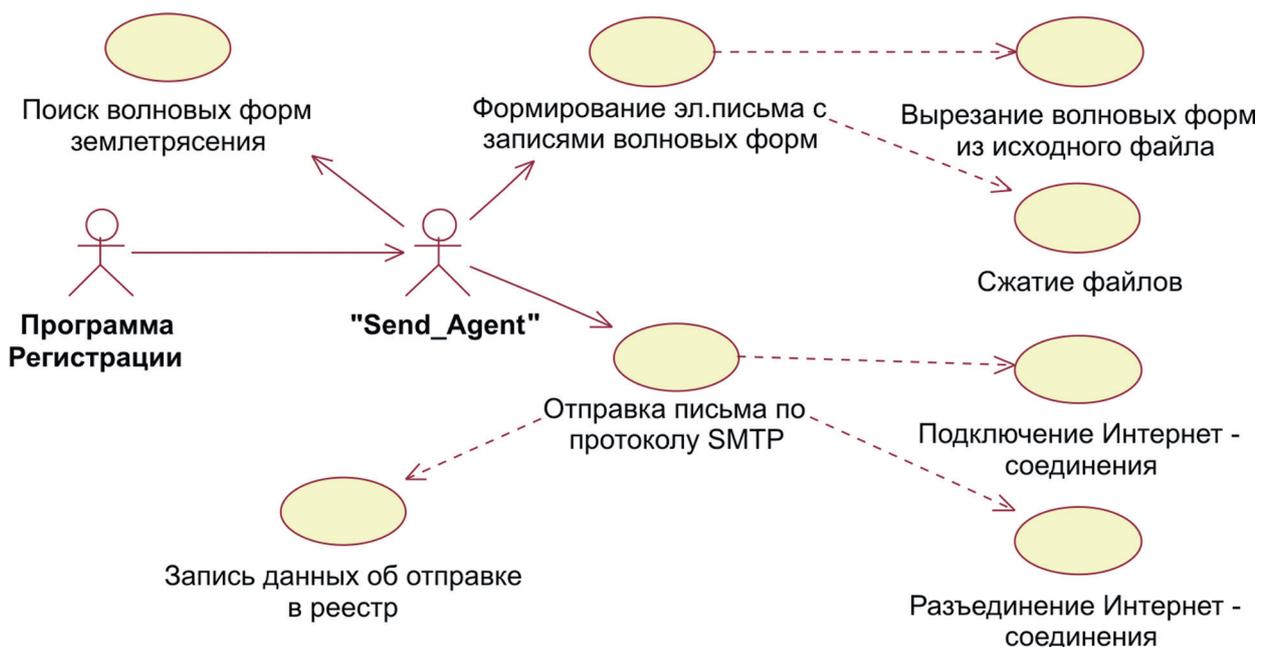


Рис. 3. Схема основных функций модуля «Send_Agent»

4. Группировка файлов-записей с различных станций по событиям. Программа проверяет наличие совпадения по времени предыдущих принятых файлов и текущего, при трех и более совпадениях следует запуск программы автоматической обработки.
5. Информирование сотрудников центра сбора информации звуковым сигналом об обнаружении события.
6. Сохранение информации о получении файлов со станций.
7. Запуск программы автоматической обработки региональных землетрясений при получении более трех записей, совпадающих по времени.

На рис. 4 приведены диаграммы вариантов использования, отражающие основные функции модуля «Receive_Agent».

С 2010 года программный комплекс «Send_Agent & Receive_Agent» используется для автоматической передачи фрагментов записей волновых форм землетрясений средствами Интернет с сети станций в ЦСИ в режиме времени, близком к реальному. На октябрь 2012 года на 24 станциях Байкальского филиала Геофизической службы (рис. 1) функционирует программа «Send_Agent», в центре сбора информации (сейсмическая станция Иркутск) – приложение «Receive_Agent». Эмпирически установлено, что при событии с энергетическим классом $K_p \geq 10$ в течение 2-5 мин с момента землетрясения в ЦСИ оказываются записи не менее чем с восьми сейсмостанций.

На рис. 5 представлен пример функционирования программного комплекса «Send_Agent & Receive_Agent» для получения сейсмических записей сети станций на примере землетрясения 3 октября 2012 г. с энергетическим классом $K_p = 10,4$. Справа на рисунке показан интерфейс модуля «Receive_Agent», слева представлены по одному каналу для каждой сейсмостанции соответствующие волновые формы.

Автоматическая обработка региональных землетрясений Прибайкалья

При получении файлов-записей волновых форм землетрясения с нескольких сейсмостанций в автоматическом режиме запускается программа «AutoBykl» обработки региональных землетрясений, разработанная в Байкальском филиале Геофизической службы СО РАН [5].

Программа автоматической обработки землетрясений выполняет следующие функции:

1. Определение основных параметров землетрясения.
2. Предоставление полученных результатов на каждом этапе функционирования программы в визуальной форме: построение карты с эпицентром землетрясения, вывод протокола обработки землетрясения.

Постановка задачи.

Цель оперативной автоматической обработки – определение основных параметров регистрируемого землетрясения:

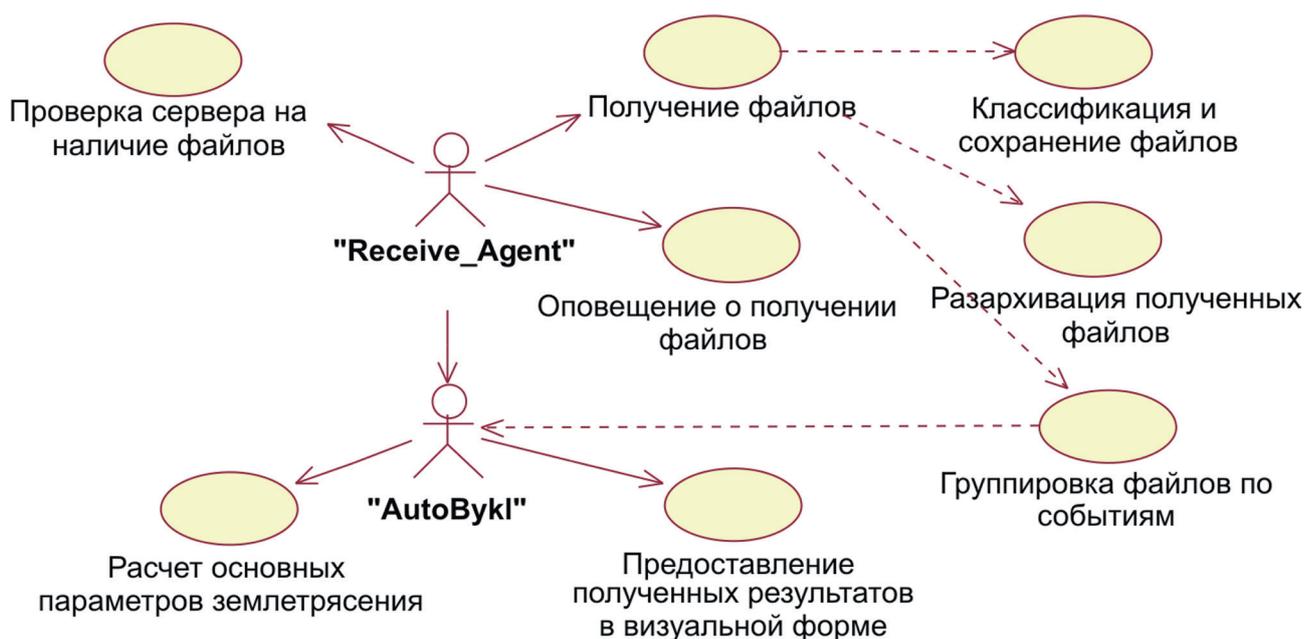


Рис. 4. Схема основных функций модуля «Receive_Agent»

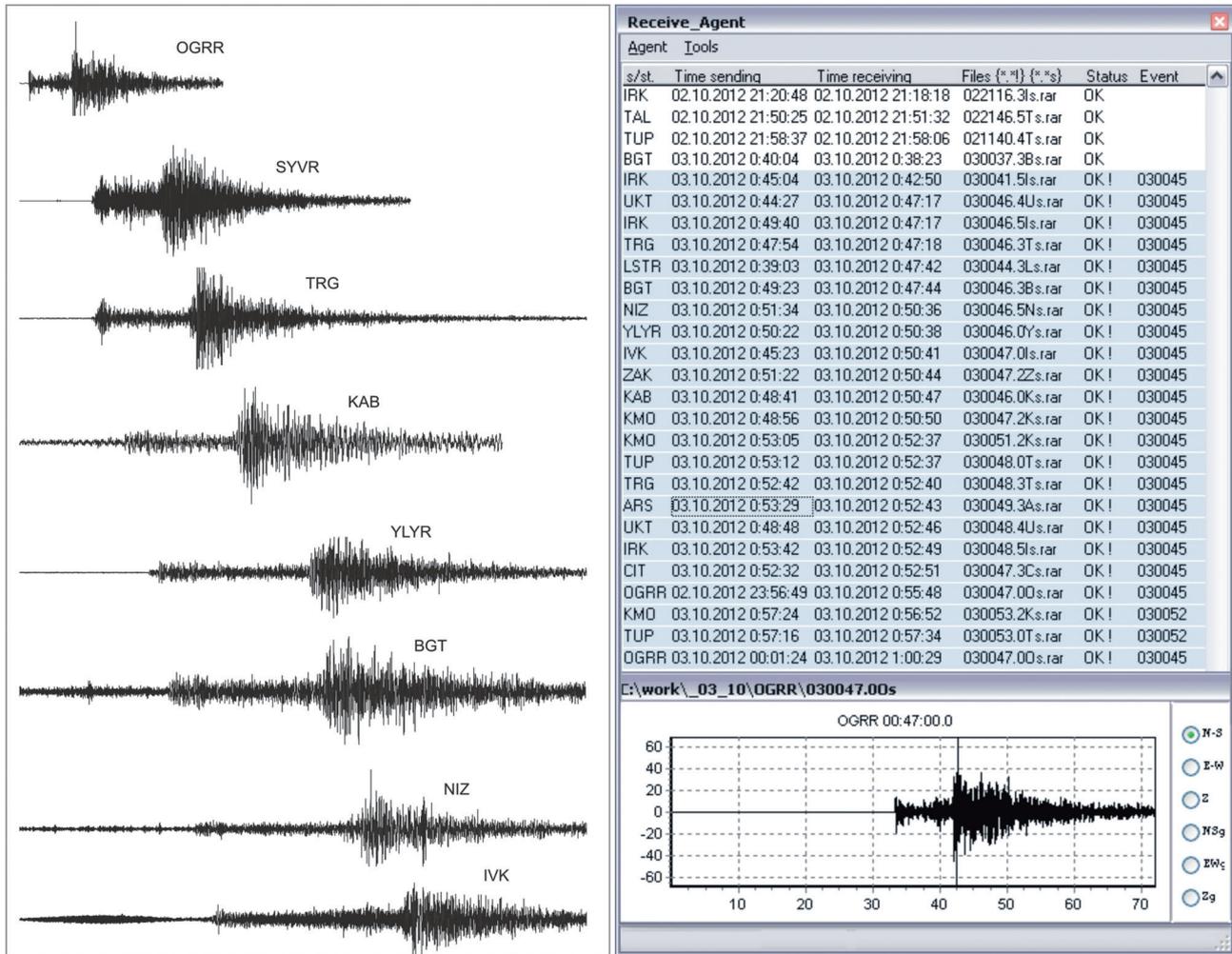


Рис. 5. Пример функционирования программного комплекса «Send_Agent & Receive_Agent» при землетрясении 3 октября 2012 г. с энергетическим классом $K_p = 10,4$

- местоположения эпицентра, географических координат (широты φ_0 и долготы λ_0);
- времени возникновения t_0 ;
- величины энергетического класса K_p и магнитуды M .

Исходными данными для определения параметров произошедшего землетрясения является набор фрагментов трех (N-S, E-W, Z) или шестикомпонентных (N-S, E-W, Z, NSg, EWg, Zg) записей волновых форм, зарегистрированных сейсмическими станциями Прибайкалья в файлах формата «Baikal».

Каждый файл-запись формата «Baikal» состоит из структуры «Main-header», структур «Channel-header» по количеству содержащихся каналов в файле и самих данных.

Структура «Main-header» занимает 120 байт и содержит информацию: количество каналов, номер версии программы регистрации, дата регистрации (день, месяц, год), количество видимых спутников, количество секунд без синхронизации, признак синхронизации со спутниками, разрядность исполь-

зуемого АЦП при регистрации, код сейсмической станции, частота дискретизации данных в секундах, время первой точки в секундах от начала текущих суток и географические координаты сейсмической станции (широта, долгота).

Структура «Channel-header» для каждого канала имеет объем 72 байта и состоит из полей: физический номер канала, имя канала, тип используемого датчика, коэффициент канала (количество микрон на дискрету), частота калибровки канала.

После структур последовательно записаны данные, размер одного отсчета зависит от разрядности АЦП (2 или 4 байта). Длина станционных записей поступающих в режиме реального времени составляет примерно от 50 до 170 секунд.

Подход к решению

Первоочередной задачей в процессе обработки сейсмических сигналов является обнаружение самого сигнала – определение моментов вступления прямых сейсмических волн Pg и Sg [6]. Программа

ориентирована на обработку региональных землетрясений с расстояниями до сейсмостанций менее 180-200 км, так как на таких расстояниях сейсмограммы, полученные на станциях Прибайкалья, содержат преимущественно прямые сейсмические волны (Pg и Sg) [7].

Действующая схема расположения сейсмостанций и оснащённость их средствами связи с Интернетом позволяют охватить большую часть Байкальской рифтовой зоны, где возможна автоматическая локация эпицентров землетрясений (рис. 1).

Главным условием при решении задачи локации эпицентра землетрясения является правильная интерпретация фаз Pg и Sg . Для определения моментов вступления прямых сейсмических волн Pg и Sg по цифровым трехкомпонентным сейсмограммам применена методика детектирования сейсмических событий, основанная на анализе отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах (STA/LTA – Short Time Average to Long Time Average), которым моделируется отношение сигнал-шум (SNR – Signal-to-Noise Ratio). Вопросы применения критерия STA/LTA для детектирования сейсмических событий подробно рассмотрены в работах [8, 9].

Для рассматриваемой системы выбрано $N_{STA} = 10$ (0,1 секунды) и $N_{LTA} = 300$ (3 секунды). В случае превышения порогового значения STA/LTA (от 5 до 3, в зависимости от зашумленности записей) событие считается обнаруженным. Превышение коэффициента SNR позволяет предполагать обнаружение вступления волн Pg и Sg (рис. 6).

Отмечены случаи, когда происходят события слабые по критерию STA/LTA , но на взгляд интерпретатора совершенно «осмысленные». Поэтому детектирование проводится в несколько этапов: пороговое значение STA/LTA изменяется от 5 до 3 с шагом 0,5; процесс детектирования прекращается при обнаружении события по записям трех станций (в частных случаях по записям двух станций) или в случае, когда пороговое значение детектора принимает минимальное возможное значение.

Определение основных параметров землетрясений проводится с помощью подпрограммы «Региональная зона» (авторы С.И. Голенецкий, Г.И. Первалова), минимизирующей сумму квадратов невязок моментов вступлений сейсмических волн [10]. В качестве исходных данных в расчетах служат координаты сейсмических станций, моменты вступлений сейсмических волн на эти станции (t_{Pg} , t_{Sg}) и соответствующие максимальные амплитуды. Программа «Региональная зона» рассчитывает координаты и глубину очага, время в очаге землетрясения, невязки для всех задаваемых волн, энергетический класс землетрясения; вычисляет погрешности в определении всех параметров очага.

В наиболее общем случае при решении задачи о гипоцентре минимизируется сумма

$$\sum \left\{ \left(t_{Sg_i} - t_0 - \frac{\sqrt{d_i^2 + h^2}}{v_{Sg}} \right) + \left(t_{Pg_i} - t_0 - \frac{\sqrt{d_i^2 + h^2}}{v_{Pg}} \right) + \left(t_{Pi} - t_0 (2H - h) \sqrt{\frac{11}{v_{cp}^2} - \frac{1}{v_{Pg}^2} - \frac{d_i}{v_{Pg}}} \right)^2 \right\},$$

где t_{Sg_i} , t_{Pg_i} , t_{Pi} – моменты вступления соответствующих волн на i -станцию; H – средняя мощность земной коры, полагаемая равной 40 км; h – глубина очага; $v_{Pg} = 6,15$ км/с; $v_{Sg} = 3,58$ км/с; $v_{cp} = 6,4$ км/с (средняя скорость распространения P -волн в земной коре по данным ГСЗ); d_i – эпицентральный расстояние i -станции в км. Глубина очага на первом этапе не определяется, а задается равной 10 км. Минимизация указанной выше суммы квадратов невязок производится поэтапно. В результате после серии приближений на каждом этапе гарантируется истинное (окончательное) решение, находящееся по каждой переменной в пределах ее заданного изменения [11].

Алгоритм автоматической обработки региональных землетрясений Прибайкалья

На первом этапе алгоритма происходит предварительная подготовка цифровых записей.

1. Производится проверка для 6-канальных записей на нарезание значений у чувствительных каналов (в случае сильных землетрясений). Если значения чувствительных каналов (N-S, E-W, Z) превосходят установленный критерий, то дальнейшая обработка производится по грубым каналам (NSg, EWg, Zg).

2. Для каждой станционной записи по всем компонентам производится процедура нормализации. Нормализованное значение f_k для k -го отсчета вычисляется по формуле

$$f_k = f_k^- - \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n}, \tag{1}$$

где f_k^- – значение k -го отсчета, f_i – отсчеты сейсмической записи, n – количество отсчетов содержащихся в файле для соответствующей компоненты.

Во второй части алгоритма программы заложено решение прямой задачи: определение географических координат эпицентра (широты φ_0 и долготы λ_0), время возникновения t_0 по определенным с помощью детектирования фазам Pg и Sg .

3. По выбранным компонентам N-S, E-W, Z или NSg, EWg, Zg производится детектирование записи. Если f_i – отсчеты сейсмической записи, N_{STA} и N_{LTA} – количество отсчетов коротко- и длинно-

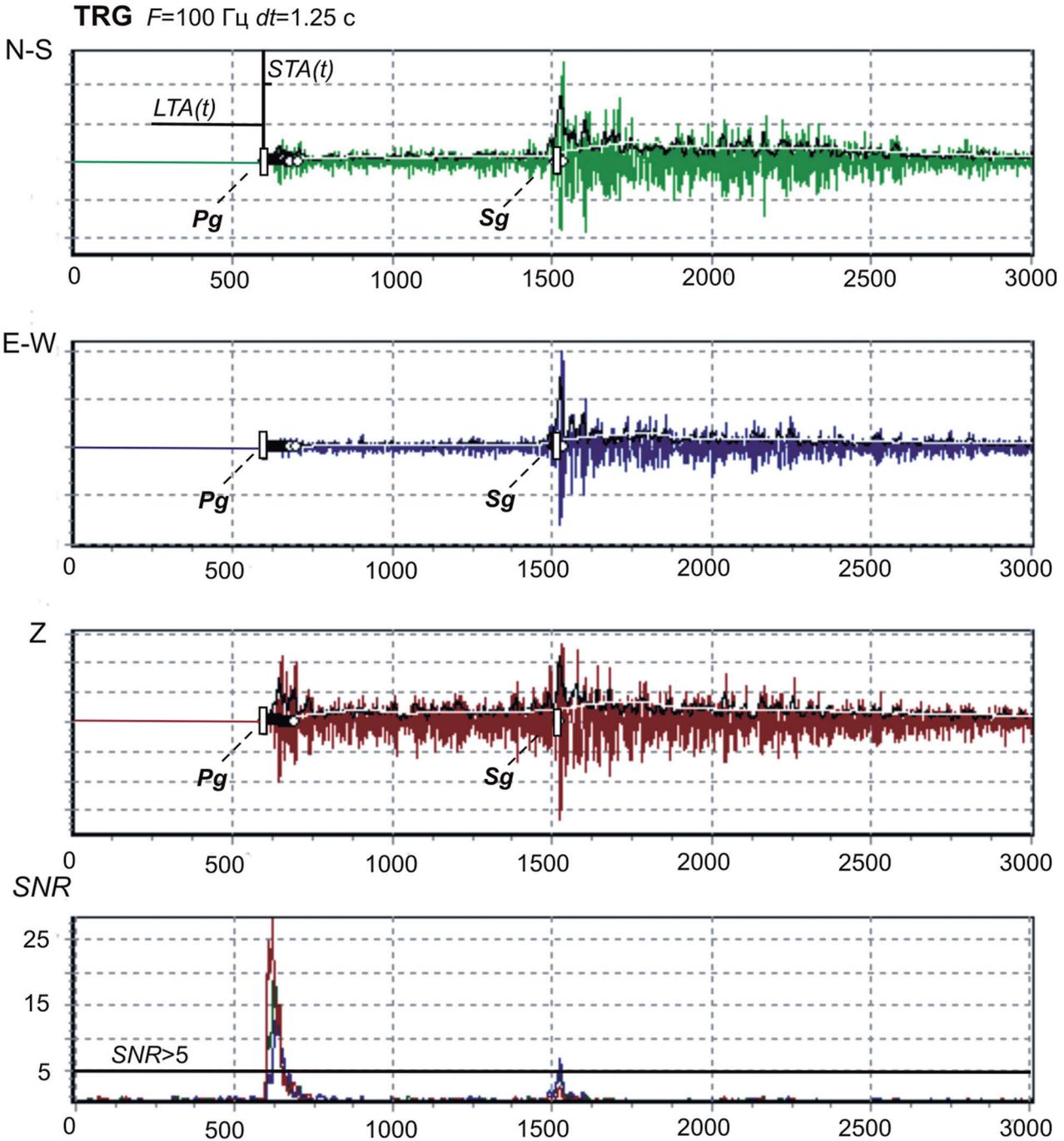


Рис. 6. Схема детектирования сейсмического сигнала по трехкомпонентной записи сейсмической станции «Тырган» (TRG) с коэффициентом SNR = 5

периодного усреднения, то критерий STA/LTA для k -го отсчета выражается соотношениями

$$STA_k = \frac{1}{N_{STA}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{STA}} |f_{k+i}| \quad (2)$$

$$LTA_k = \frac{1}{N_{LTA}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{LTA}} |f_{k-i}| \quad (3)$$

$$SNR_k = \frac{STA_k}{LTA_k} \quad (4)$$

По каждой записи формируются списки срабатывания детектора для каждой компоненты –

запоминаются временные точки, соответствующие превышениям отношений сигнал-шум (SNR) порогового значения (первоначально пороговое значение берется равным 5).

4. Анализируются списки срабатываний детектора, полученные фазы объединяются в одну; если они достаточно близки по времени (0,1-0,5 с), то вместо них генерируется усредненная фаза:

$$t = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i (STA / LTA)_i}{n} \right) \quad (5)$$

Если t определяется по двум и более компонентам в интервале 0,1-0,5 с, то значение t усредняется и интерпретируется как момент вступления прямой волны Pg или Sg (первые моменты предполагаются как фазы Pg , соответственно следующие моменты рассматриваются как время вступления волны Sg).

Если фазы Pg и Sg определены меньше чем по трем записям, то процесс детектирования производится заново с уменьшением порогового значения – повторяется пункт 3 (STA/LTA изменяется от 5 до 3 с шагом 0,5).

5. Для проверки истинности найденных фаз по каждой определенной паре моментов вступления волн t_{Pg}, t_{Sg} , зная средние скорости соответствующих волн для рассматриваемого региона $v_{Pg} = 6,15$ км/с, $v_{Sg} = 3,58$ км/с и скорость фиктивной волны $v_{\phi} = 8,57$ км/с, рассчитывается время в очаге:

$$t_0 = \left(\left(t_{Pg} - v_{\phi} \cdot \frac{t_{Sg} - t_{Pg}}{v_{Pg}} \right) + \left(t_{Sg} - v_{\phi} \cdot \frac{t_{Sg} - t_{Pg}}{v_{Sg}} \right) \right) / 2. \quad (6)$$

По записям разных станций выбираются t_0 , близкие между собой по времени (1-2 с), соответствующие фазы t_{Pg}, t_{Sg} группируются по событиям. В дальнейшей обработке рассматриваются события, имеющие как минимум 2 или 3 пары фаз t_{Pg}, t_{Sg} .

В случае, когда ни одно событие не определено – недостаточно количества фаз, пороговое значение детектора уменьшается (минимальное пороговое значение равно 3), программа переходит к пункту 3.

6. При наличии одной группы фаз и если время возникновения события совпало только по записям двух сейсмостанций, происходит дополнительный анализ списков срабатываний детектора, определенных по данным ближайших станции (на расстоянии 100-150 км от станции, по записи которой найдено самое раннее t_{Pg}). Если уровень SNR_k значительно превышает установленный критерий (в 30-15 раз), то соответствующее время t_k интерпретируется как время вступления фазы Pg и добавляется к определенным по другим записям фазам.

7. Если имеется несколько групп фаз, то в обработке рассматривается группа с наибольшим количеством фаз.

В случае наличия нескольких групп с одинаковым количеством фаз, и в каждой группе моменты вступления волн Pg, Sg определены по записям трех и более сейсмостанций, рассчитывается начальное приближение для основных параметров землетрясения: время в очаге – t_0 , координаты эпицентра – φ_0, λ_0 . Определение основных параметров землетрясений проводится с помощью подпрограммы «Региональная зона».

На следующем шаге алгоритма проверяется превышение невязок времен пробега сейсмических волн заданного порога; при наличии неудовлетворительных невязок соответствующие фазы исключаются из обработки, и происходит перерасчет параметров землетрясения.

8. После того как получены первые параметры ($t_0, \varphi_0, \lambda_0$) для каждой группы фаз, производится проверка на истинное событие. Истинным событием считается группа, имеющая минимальное расстояние от эпицентра до сейсмостанции, по записи которой были определены моменты вступления волн Pg, Sg .

Если в каждой группе эпицентральные расстояния превосходят установленное ограничение в 300 км, то все события считаются ложными, пороговое значение детектора уменьшается (минимальное пороговое значение равно 3), программа переходит к пункту 3.

В последней части алгоритма, после того как получены удовлетворительные параметры ($t_0, \varphi_0, \lambda_0$), решается обратная задача с целью уточнения параметров очага землетрясения.

9. По найденным первичным координатам происходит поиск ближайших станций, не участвовавших в обработке. Рассчитываются времена прихода волн Pg для ближайших станций (на расстоянии 100-150 км от предполагаемого очага землетрясения):

$$t_{Pg} = t_0 + \frac{d}{v_{Pg}}, \quad (7)$$

где d – расстояние от сейсмостанции до эпицентра землетрясения, $v_{Pg} = 6,15$ км/с – средняя скорость волны Pg для Прибайкалья. Из списков срабатываний детектора, определенных по записям ближайших станций, выбираются времена t_k , близкие к рассчитанным, при условии $|t_k - t_{Pg}| < 1$ с, и предполагаются как времена вступлений фаз Pg . Найденные фазы Pg добавляются к входным данным для расчетного модуля, и переопределяются основные параметры землетрясения. После этого этапа также производится проверка на приемлемость полученных невязок времен пробега сейсмических волн.

10. Затем аналогично анализируются списки срабатываний детектора по оставшимся записям сейсмостанций на наличие фаз Pg, Sg с учетом полученных параметров землетрясения. Рассчитываются моменты вступления волн Pg, Sg на сейсмостанции по формулам (7) и

$$t_{Sg} = t_0 + \frac{d}{v_{Sg}}, \quad (8)$$

где $v_{Sg} = 3,58$ км/с – средняя скорость волны Sg для рассматриваемого региона.

Ближайшие к полученным моментам времена из списков срабатывания детектора предполагаются как соответствующие фазы и также добавляются в обработку. Производится перерасчет основных параметров землетрясения: времени в очаге, координат эпицентра. При наличии больших невязок времен пробега сейсмических волн соответствующие фазы исключаются из обработки и производится перерасчет параметров землетрясения.

11. Для определения величин K_p и M необходимо определение максимальных амплитуд A_{Pg} и A_{Sg} в волнах Pg , Sg . Чтобы измерить амплитуды максимальных смещений, предварительно производится численное интегрирование скоростей смещения почвы – записей чувствительных каналов (N-S, E-W, Z), и двойное интегрирование ускорений грунта – записей грубых каналов (NSg, EWg, Zg).

Для расчета энергетического класса в программе заложена номограмма Т.Г. Раутиан [12]. Зная максимальные амплитуды в волнах и эпицентральное расстояние, по номограмме определяется энергетический класс землетрясения K_p .

Полученные амплитуды соответствующих волн добавляются к входным данным для расчетного модуля, затем рассчитываются параметры землетрясения: время в очаге – t_0 , координаты эпицентра – φ_0 , λ_0 , энергетический класс – K_p .

Магнитуда определяется по формуле

$$MSH = \sum_{k=1}^N (1,32 \lg d_k + \lg A_{Sgk}), \quad (9)$$

где N – число станций, по которым определены вступления волн Sg ; d_k – расстояние от эпицентра до k -станции; A_{Sgk} – максимальная амплитуда, определенная в волне Sg по записи k -станции.

Рассмотренный алгоритм представлен в виде блок-схемы на рис. 7.

На основании описанного алгоритма разработана компьютерная программа «AutoBykl». Программа имеет два режима интерфейса. На рис. 8 представлен пользовательский графический интерфейс прототипа приложения «AutoBykl» с результатами обработки регионального землетрясения 18 октября 2012 г. с $K_p = 9,9$. При графическом режиме функционирования приложения возможно отслеживать каждый шаг выполнения алгоритма и производить оптимальную настройку системы. Второй режим работы программы «AutoBykl» – автоматический, скрытый – пользователю доступны только полученные результаты.

Программа «AutoBykl» с 1 января 2012 года функционирует в Центре сбора информации (станция Иркутск). Полученные решения в автоматическом режиме обязательно оцениваются экспертом – инженером ЦСИ.

Пример обработки регионального землетрясения Прибайкалья в режиме реального времени

Результаты автоматической обработки землетрясения 1 октября 2012 года, определенные с помощью программы «AutoBykl» по мере поступления записей с сейсмостанций, приведены на рис. 9.

На каждом этапе представлены основные параметры землетрясения с ошибками определения и время получения решения. Через 2 мин (см. рис. 9, 1) с момента землетрясения по записям трех станций было получено первое решение: определены координаты эпицентра, время в очаге и энергетический класс.

На рис. 9 желтым цветом отмечены опорные станции (по записям этих станций определено начальное приближение для основных параметров землетрясения). Белым цветом показаны сейсмостанции, по записям которых отбирались фазы для уточнения полученного решения. Последний результат автоматической обработки (см. рис. 9, 4) был определен через 6 мин по записям 13 станций, ошибка определения координат эпицентра составила менее 2 км.

Результаты функционирования информационной системы мониторинга сейсмичности Прибайкалья в режиме реального времени

За период с 1 января по 21 ноября 2012 г. зарегистрировано и обработано в автоматическом режиме 120 землетрясений (рис. 10). Оперативный каталог Байкальского филиала Геофизической службы за представленный период насчитывает 89 событий. Кроме землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 9,5$, составляющих оперативный каталог за указанный период, в автоматическом режиме получены основные параметры событий, имеющих энергетический класс $K_p < 9,5$.

Как показало сравнение результатов ручной и автоматической обработки, средняя ошибка в определении координат эпицентра составила 5 км. Точность определения основных параметров землетрясения зависит от количества участвующих в обработке станций и расположения их относительно эпицентра. Среднее время автоматической обработки событий за представленный период составляет 3-7 мин с момента возникновения землетрясений.

Заключение

Разработан программный комплекс «Send_Agent & Receive_Agent» для автоматического получения цифровых сейсмических записей с сети станций в центре сбора информации в режиме

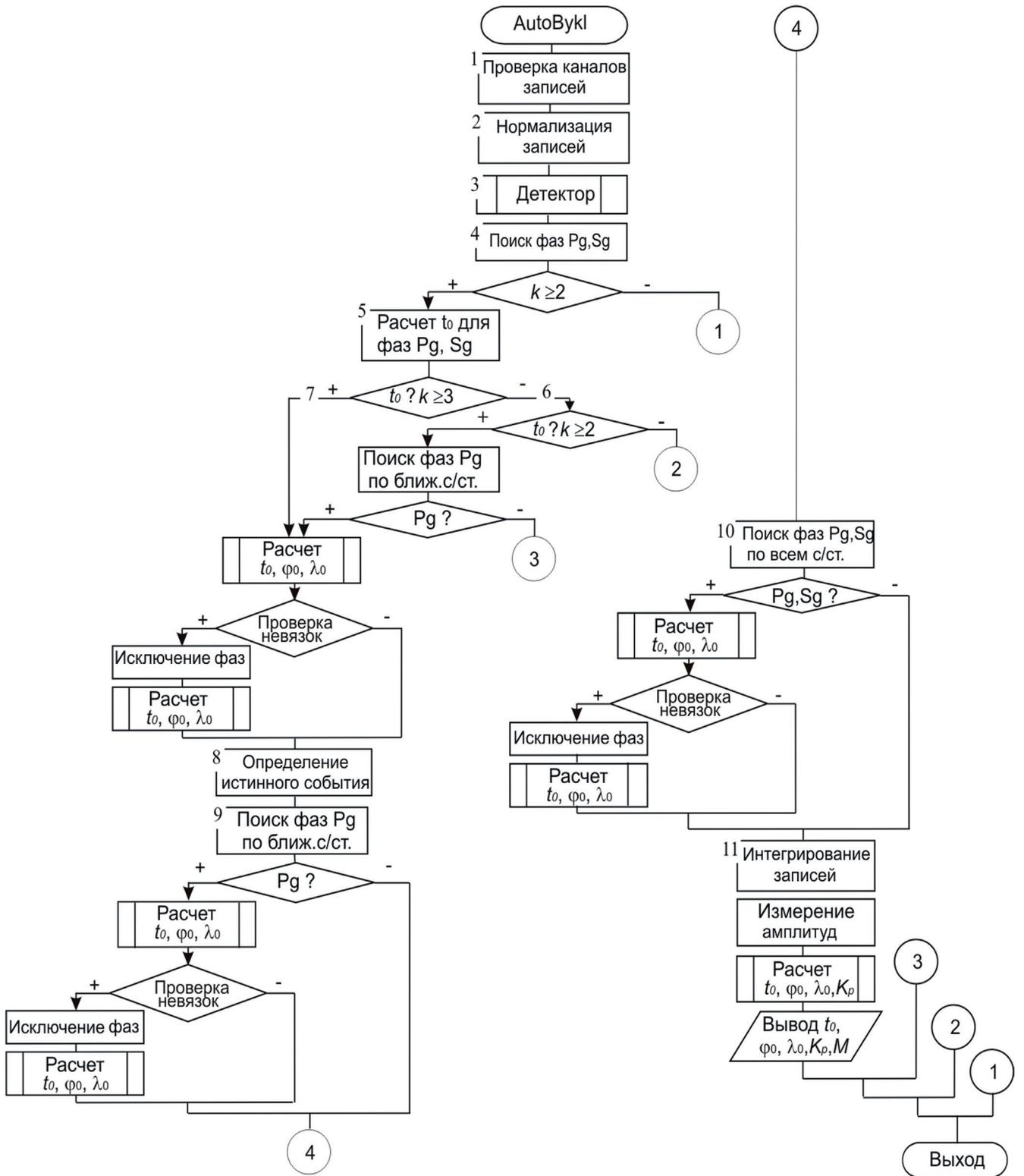


Рис. 7. Блок-схема алгоритма автоматической обработки региональных землетрясений Прибайкалья. 1-11 – см. пояснения в тексте

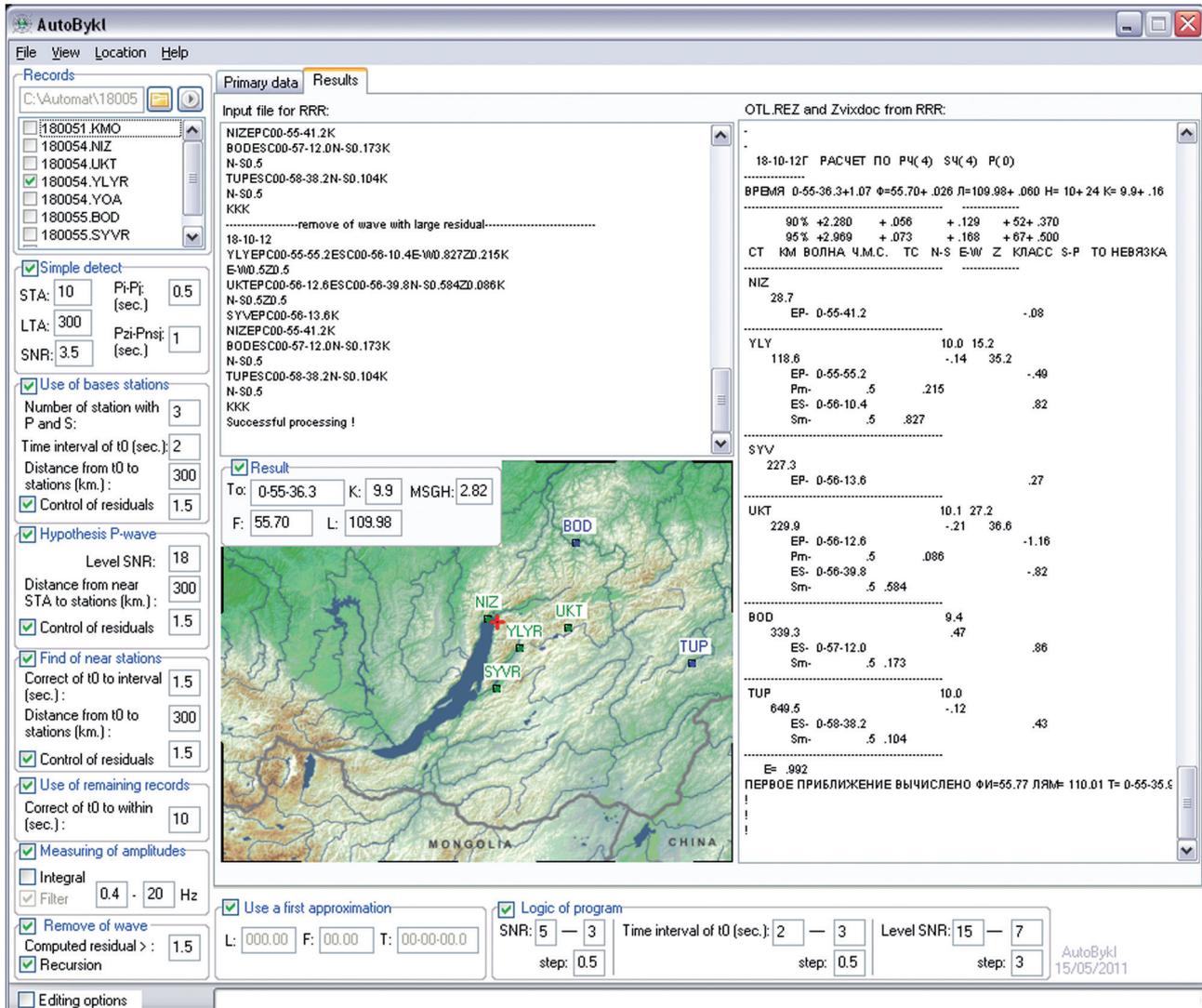


Рис. 8. Интерфейс прототипа программы «AutoBykl» для автоматической обработки региональных землетрясений Прибайкалья

реального времени, адаптированный к используемой аппаратуре сейсмостанций и имеющимся средствам связи. Программный комплекс «Send_Agent & Receive_Agent» используется в Байкальском филиале Геофизической службы СО РАН с 2010 года.

Авторами предложен алгоритм автоматического определения основных параметров землетрясений, основанный на распознавании фаз прямых сейсмических волн P_g и S_g по трехкомпонентным записям сейсмостанций, адаптированный к конкретной конфигурации сейсмостанций и использующий скоростную модель для территории Прибайкалья и Забайкалья.

На основании предложенного алгоритма составлена компьютерная программа «AutoBykl», функционирующая в Центре сбора информации БФ ГС СО РАН с 1 января 2012 года.

Комплекс описанных программ и информационных потоков составляет информационную систему

автоматического мониторинга сейсмичности в режиме реального времени. Разработанная информационная система позволяет производить автоматический мониторинг сейсмичности Прибайкалья в режиме реального времени. В течение 3-7 мин с момента возникновения землетрясений известны основные параметры произошедшего события: время в очаге, географические координаты, сила события – энергетический класс и магнитуда.

Ключевые слова: информационная система, сейсмический мониторинг, автоматическая обработка землетрясений, детектирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масальский О.К., Гилева Н.А., Мельникова В.И., Хайдунова Е.В. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2010 году. – Обнинск : ГС РАН, 2012. – С. 32-36.

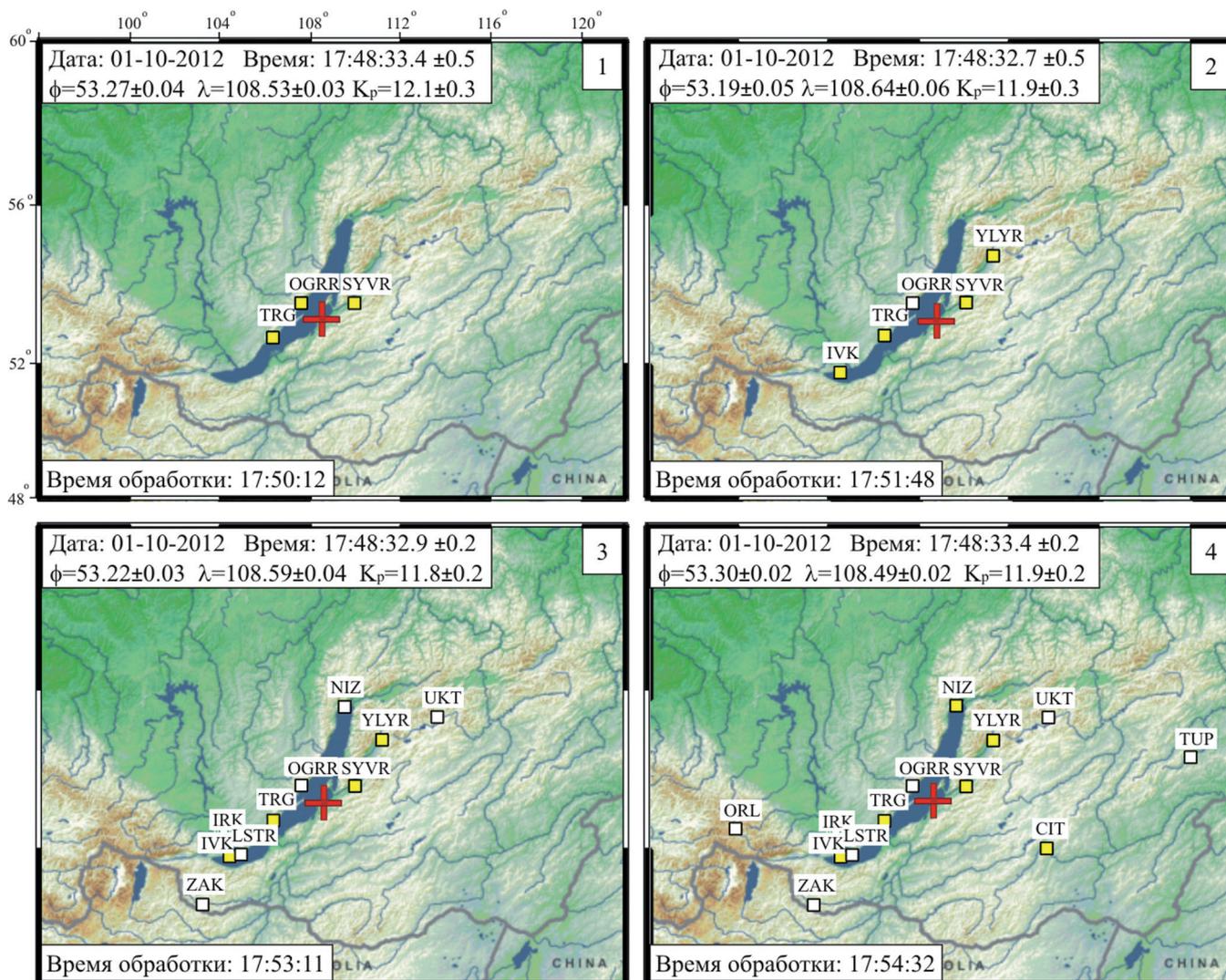


Рис. 9. Результаты автоматической обработки землетрясения 01.10.2012 г., полученные с помощью программы «AutoVukl». Пояснения см. в тексте

2. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Масальский О.К. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск : ГС РАН, 2012. – С. 151-162.

3. Хритова М.А. Автоматизация функций Геофизической службы Прибайкалья // Винеровские чтения : труды IV Всерос. конф., ч. II. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 242-248.

4. Хритова М.А., Гилева Н.А. Программный комплекс для автоматической пересылки волновых форм землетрясений с сейсмостанций в Центр сбора информации в режиме, близком к реальному времени // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : мат-лы Пятой Междунар. сейсмол. школы. – Обнинск : ГС РАН, 2010. – С. 243-246.

5. Хритова М.А., Гилева Н.А. Автоматическая обработка региональных землетрясений Прибайкалья

и Забайкалья // Сейсмические приборы – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 15-27.

6. Кушнир А.Ф. Трехкомпонентный анализ сейсмограмм для оценивания параметров Р и S волн // Обработка изображений геофизической среды / под ред. д.ф.-м.н. В.Ф. Писаренко и к.ф.-м.н. В.В. Радужного. – М. : Наука, 1989. – С. 70-88.

7. Инструкция по обработке сейсмологических наблюдений на сейсмических станциях БОМСЭ / отв. составители: Г.Я. Медведева, Л.П. Охлопова, И.Г. Голенецкая. – Иркутск, 1983. – 33 с.

8. Freiburger W.F. An approximate method in signal detection // Quarterly Appl. Math. – 1963. – V. 20. – P. 373-378.

9. Joswig M. Pattern Recognition for Earthquake Detection // Bulletin of Seismological Society of America. – 1990. – V. 80. – № 1. – P. 170-186.

10. Голенецкий С.И., Первалова Г.И. Программа определения основных параметров землетрясений по наблюдениям региональной сети сейсмических станций Прибайкалья // Применение математических методов и ЭВМ в геологии и геофизике : сборник алгоритмов и программ. – Иркутск, 1984. – С. 35-54. – Деп. в ВИНТИ 03.12.1984, № 7675.

11. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР в 1985 году. – М. : Наука, 1988. – С. 124-135.

12. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности / отв. ред. Ю.В. Ризниченко. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – С. 75-113. (Труды ИФЗ АН СССР ; № 9 (176)).

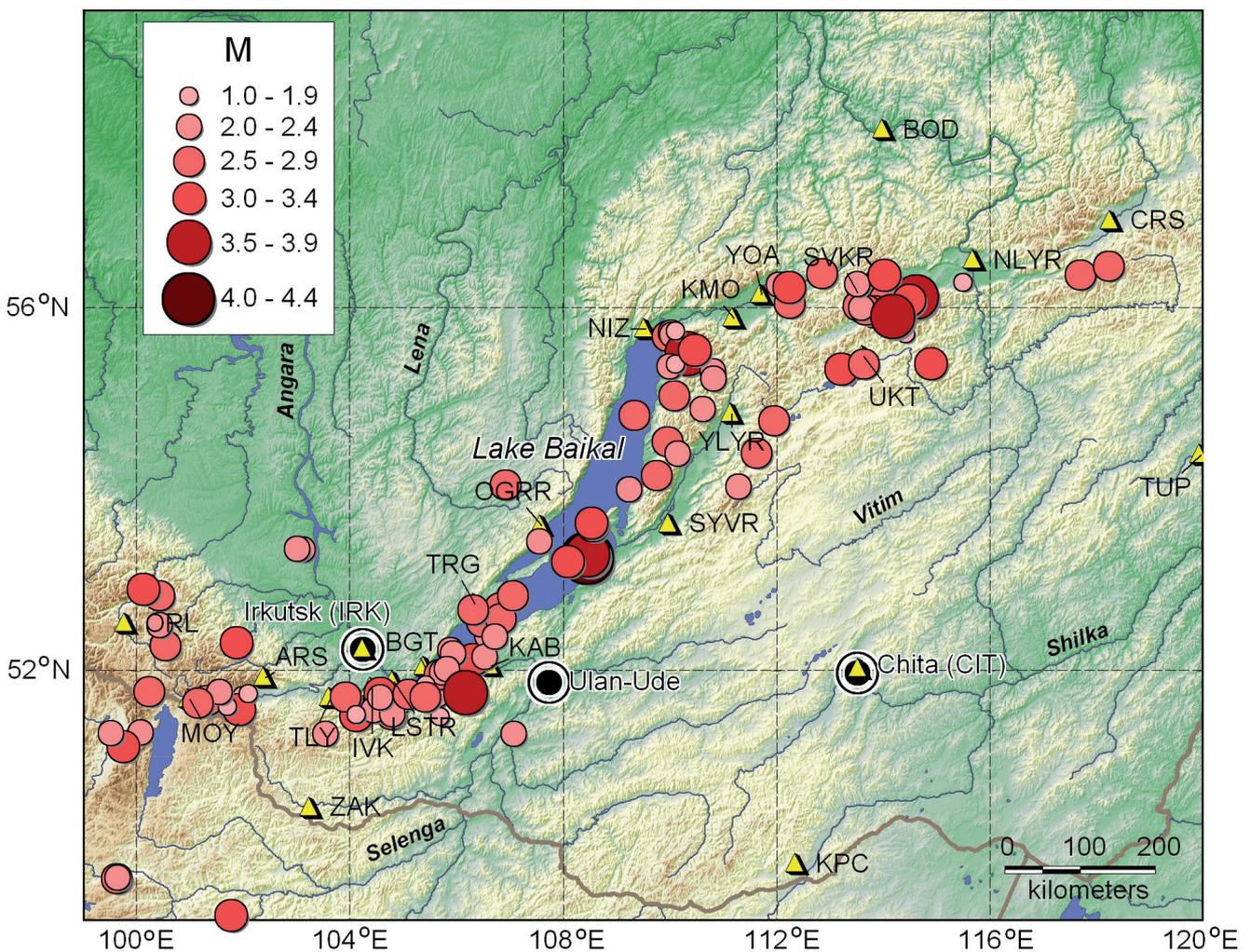


Рис. 10. Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных программой «AutoVukl» за период с 01.01 по 24.10.2012 г.