

ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ

Чебров В.Н.¹, Гусев А.А.^{1,2}, Гусяков В.К.³, Поплавский А.А.^{4,5}

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, *chebr@emsd.ru*

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

⁴ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

⁵ Сахалинский филиал ГС РАН, Южно-Сахалинск

Введение

Цунами - опасные природные явления, которые могут повлечь за собой массовую гибель людей, разрушение населенных пунктов, уничтожение экономического потенциала. Только в XX веке, мощные цунами неоднократно обрушивались на тихоокеанские побережья России (1923, 1952, 1959, 1969 и 1994 гг.). Основным фактором, вызывающим волны цунами (примерно 85%), являются подводные землетрясения. Исторические и геологические данные надежно обосновывают для Дальнего Востока России высокий уровень опасности цунами и землетрясений; несомненно, они систематически будут повторяться здесь и в будущем [3, 8].

На Дальнем Востоке России служба предупреждения о цунами (СПЦ) была создана в 1958-1959 годах после разрушительного цунами в 1952 г. Используя данные трехкомпонентной регистрации сейсмических сигналов, можно найти координаты эпицентра и магнитуду, то есть определить место возникновения очага землетрясения и его мощь. Оценка вероятности возникновения цунами по этим параметрам составляет сущность магнитудно-географического критерия, использование которого лежит в основе работы СПЦ до настоящего времени [5, 7].

Для того чтобы предупреждение о цунами оказалось своевременным, положение эпицентра и сила землетрясения должны быть определены с минимальными задержками после его начала. Для этого сейсмические станции службы были оборудованы специально разработанной сейсмической аппаратурой, которая до последнего времени является основной на сейсмических станциях СПЦ [2]. Это стандартные механические сейсмографы с малым увеличением СМР и специально разработанные для оперативной работы приборы УБОПЭ (устройство быстрого определения эпицентра) с увеличением от 1 до 30. Диапазон регистрируемых периодов $T_m=2-4$ с по уровню 0,9 [1]. Запись сейсмических сигналов до настоящего времени производится на закопченную бумагу. Эти механические установки, рассчитанные на регистрацию сильных землетрясений на эпицентральных расстояниях 150 - 2000 км в узком диапазоне периодов 0.2 - 4.0 сек, хотя и давно уже отработали свой ресурс, до последнего времени являются основными приборами на сейсмических станциях "Северо-Курильск" и "Петропавловск". На станции "Южно-Сахалинск" они демонтированы еще в конце 80-х годов.

В 60-х гг. XX века на станциях дополнительно были установлены стандартные приборы системы Кирноса (СК) с периодом собственных колебаний маятников $T_s=12$ с [1]. В силу малого динамического диапазона записи этих приборов можно было использовать только для более далёких или не очень сильных близких землетрясений. Запись сейсмических сигналов в приборах СК производилась на фотобумагу, что не давало возможности использовать эти записи для оперативной оценки азимута на эпицентр.

В 70-х гг. XX века на станциях были установлены сейсмографы с видимой записью на тепловой бумаге СКД-УП-СПР ($T = 20$ с; $V = 1000, 200, 50$ и 10) [1]. Использование их для регистрации сильных близких землетрясений из-за малого динамического диапазона маятников СКД было ограничено магнитудами 6,0 - 6,5. Была внедрена видимая регистрация по каналу СКД - УП-СПР, были установлены длиннопериодные сейсмографы ДС - БП. [1].

В 1980 г. было принято Постановление Совета Министров СССР (№ 821 от 23.09.80) «О мерах по дальнейшему совершенствованию и организации своевременного предупреждения населения приморских районов Дальнего Востока о морских волнах, вызываемых подводными землетрясениями (цунами)». Этим Постановлением предусматривалось создание в 1985-90 гг. на Дальнем Востоке единой автоматизированной системы (ЕАС) наблюдения за возникновением и распространением цунами "Цунами" (ЕАСЦ). В ходе работ по выполнению Постановления в начале 80-х гг. XX века была разработана структура ЕАСЦ, включающая в себя сейсмическую и

гидрофизическую подсистемы; подсистему связи и ряд центров сбора и обработки информации. В ходе работ были проработаны методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами [4]. В конце 80-х и 90-х гг. прошлого века по ряду объективных причин, проблема цунами в России отошла на второй план и уже начатые работы были не завершены.

Повышение интереса в мире к проблеме предупреждения цунами на настоящем этапе обусловлено сильнейшим Суматра-Андаманским землетрясением 26 декабря 2004 г., вызвавшего катастрофическое цунами, которое унесло жизни более 200 тысяч человек и нанесло значительный экономический ущерб. В соответствии с поручением Президента РФ работы по развитию СПЦ включены в ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года».

Геофизической службой РАН, Камчатским филиалом в 2006-2007 гг. в рамках Государственных контрактов на выполнение НИОКР "Развитие сети сейсмологических наблюдений и средств обработки и передачи данных в целях предупреждения о цунами" разработана концепция развития системы сейсмологических наблюдений для СПЦ на Дальнем Востоке России (СН СПЦ). Работы проводились в рамках выполнения мероприятия 18 ФЦП "Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года". Государственный Заказчик – Федеральная служба по гидрометеорологии и охране окружающей среды (Росгидромет). Исполнитель – Геофизическая служба РАН (ГС РАН). В работе принимали участие специалисты ведущих институтов РАН (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Институт физики Земли РАН, Институт океанологии РАН, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН).

Сейчас служба предупреждения о цунами на Дальнем Востоке Российской Федерации является функциональной подсистемой Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ФП РСЧС-ЦУНАМИ), которая представляет собой межведомственную организационную структуру. Сейсмологические наблюдения обеспечивает Геофизическая служба РАН, наблюдения за уровнем моря - Росгидромет.

Основной целью развития системы сейсмологических наблюдений и средств обработки и передачи данных для СПЦ является последовательное снижение рисков чрезвычайных ситуаций, вызываемых цунами, максимальное снижение рисков гибели людей и материальных ценностей, повышение защищенности критически важных объектов от угрозы цунами для обеспечения безопасной жизнедеятельности и устойчивого развития дальневосточного региона России. Для реализации указанной цели необходимо обеспечить существенное повышение оперативности, надежности и достоверности обнаружения и распознавания цунамигенных землетрясений путем (1) технического переоснащения сети сейсмологических наблюдений (2) развития новых подходов к анализу данных и их программной реализации (3) создания информационно и научно-методического обеспечения для принятия решения о возможности цунами.

Исходные данные и требования к принципам организации СН СПЦ

Перечислим исходные данные, требования и предпосылки развития сети сейсмологических наблюдений, средств обработки и передачи данных в целях повышения оперативности и надежности предупреждения о цунами.

Принципиальная возможность сейсмического метода. Принципиально возможно заблаговременное предупреждение о возможности цунами за счет существенного различия скоростей распространения сейсмических волн в земной коре (4-7 км/с) и волн цунами в океане (0.1-0.2 км/с). Благодаря этому создается некоторый, в большинстве случаев весьма небольшой, запас времени между регистрацией сейсмических волн от подводного землетрясения и приходом волн цунами к ближайшему побережью.

Локальность и ресурс времени. Подавляющее большинство исторически наблюдавшихся заплесков цунами (99.5% от их общего числа и 95% всех разрушительных цунами) происходило на расстояниях до 200, реже до 1000 км от эпицентральной зоны землетрясения (локальные и региональные цунами). При этом все жертвы и наибольший ущерб происходят в течение первого часа распространения волны [10]. В конкретных физико-географических условиях наиболее опасного на Дальнем Востоке России Курило-Камчатского региона при возникновении землетрясения в пределах континентального склона, время распространения головной волны цунами до ближайших участков побережья составляет не более

15-20 минут. Поэтому сигнал предупреждения о цунами должен быть выработан за время не более 5-10 минут, что налагает довольно жесткие требования на конфигурацию системы наблюдений, систему связи и структуру технических и программных средств системы обработки.

Сеть наблюдений и ее проблемы. Сегодня службу цунами на Дальнем Востоке России несут сейсмические станции «Петропавловск-Камчатский», «Южно-Сахалинск» и «Северо-Курильск», входящие в систему наблюдений ГС РАН.

Основные недостатки действующей на Дальнем Востоке России системы сейсмологических наблюдений СПЦ (СН СПЦ) следующие:

- оборудование сейсмических станций для целей СПЦ устарело и не позволяет интегрировать датчики в информационную систему, а сами аналоговые датчики не соответствуют современным стандартам
- технология и методики принятия решения о возможности цунами требуют ревизии (не пересматривались по существу с 1959 г.);
- обработка сейсмограмм ведется вручную или частично автоматизирована без учета требований СПЦ;
- точность оценки координат и магнитуды землетрясений в оперативном режиме низкая;
- решение об опасности возникновения цунами от только что возникшего землетрясения принимается каждой сейсмической станцией автономно, совместный анализ не ведется.

Зарубежный опыт. За рубежом в ряде систем предупреждения о цунами перечисленные выше недостатки в большой мере преодолены. Основные подходы при выработке решения о возможности цунами в СПЦ Японии, США и Франции [11, 12, 13, 14, 15] следующие:

- сейсмические станции, входящие в СПЦ, как правило, оснащены широкополосными цифровыми сейсмометрическими каналами, средствами связи для передачи данных в реальном времени;
- оценки основных параметров землетрясений производится в автоматическом режиме по группе или сети станций, которые заверяются оператором;
- решение о возможности цунами, как правило, принимается оператором с учетом результатов оперативного анализа и рекомендаций, вырабатываемых автоматически;
- итеративный (повторный многократный) подход в анализе данных и принятии решения по мере накопления (поступления) данных на каждой сейсмической станции и на центрах сбора и обработки данных по сети сейсмических станций;
- широкое использование результатов предварительного моделирования очагов цунамигенных землетрясений.

Цифровые датчики и цифровые средства анализа данных. Современные сейсмические датчики, в соединении с прогрессивными цифровыми технологиями сбора и анализа данных, позволяют регистрировать сейсмические волны в широкой полосе частот с высоким разрешением и динамическим диапазоном. Современные компьютерные аппаратные средства и развитое программное обеспечение обработки данных чрезвычайно облегчают задачу всестороннего и точного анализа сейсмограммы. Анализ цифровых сейсмических записей может быть проведен с высокой оперативностью, с небольшим отставанием от реального времени, в полностью автоматическом режиме, и обеспечить тем самым радикальное повышение надежности и обоснованности оперативных прогнозов цунами по сейсмическим данным.

Многоуровневая структура. Система сейсмологических наблюдений должна иметь иерархическую структуру, в которой узлы низкого уровня могли бы решать задачи мониторинга, прогнозирования и предупреждения о цунами в неполном объеме, но при этом независимо от внешних линий связи. В ряде случаев только узлы нижнего уровня, локализованные вблизи очага землетрясения, смогут успеть подать тревогу с приемлемым уровнем заблаговременности.

Децентрализация тревоги. Необходимым условием своевременного доведения сигналов предупреждения о цунами до населения является прямой выход сигнала тревоги в систему оповещения о возможности цунами на локальном уровне, взаимодействие с подразделениями СПЦ Росгидромет и МЧС.

Развитие методических принципов. В плане методик и алгоритмов существующая система СПЦ основана на системе предпосылок, которая была вполне адекватной в 1950-1970 гг., но ныне требует пересмотра. В частности:

(1) Очаг землетрясения принимался точечным или практически локальным. Фактически очаг Камчатского землетрясения 1952 г имел длину до 500 км, очаг Суматранского землетрясения 2004 г протянулся на 1300 км. В подобных ситуациях определение эпицентра в обычном смысле может быть вводящим в заблуждение: удаленность на 1500 км от эпицентра не гарантирует ни малых амплитуд цунами, ни достаточного времени на анализ ситуации. При выработке решений СПЦ должна учитывать данный фактор. В идеале, следовало бы оперативно определять положение протяженного очага, но к этой задаче эффективных подходов пока не видно.

(2) Длительность очагового процесса принималась относительно малой, практически не более 20-40 с. В таких условиях можно ожидать: (а) как правило, волны S регистрируются на региональных расстояниях с приемлемым отношением сигнал/шум; (б) можно считать регистрацию завершенной и начинать обработку данных произошедшего землетрясения уже примерно через 60-90 с после прихода первой сейсмической волны. Как теперь достоверно известно по опыту события 2004 г на Суматре, очаговая длительность больших цунамигенных землетрясений может достигать 9 мин. И это не аномалия – длительность очагового процесса таких землетрясений в Чили в 1960 г. и на Аляске в 1964 г достигала, а скорее всего превышала 4-6 мин. В подобной ситуации возникают следующие проблемы. (а) Вступление волны S на региональных расстояниях накладывается на интенсивные волны Р от еще растущего очага, и выделение этого вступления становится безнадежной задачей. Это означает, что при сильнейших, наиболее опасных землетрясениях положение эпицентра и магнитуда не могут быть с гарантией определены по одиночной станции на основе обычного способа оценки расстояния по разности времен пробега S-P, нужны новые подходы. А оценка магнитуды без оценки расстояния до очага невозможна. (б) Даже в пределах принятого сейчас ресурса времени обработки 10 минут надежное определение магнитуды землетрясения становится принципиально невозможным, так как сейсмические волны от очага в целом просто могут не успеть пройти к станциям, так что их будущая амплитуда на записи неизвестна; в то же время крайне желательно сокращение времени на обработку. Поэтому служба цунами должна в принципе снять с себя задачу оперативной оценки магнитуды в обычном смысле; вместо этого должна вырабатываться и непрерывно уточняться текущая оценка магнитуды снизу. Иными словами, в каждый момент после обнаружения сильного землетрясения должно быть известно выработанное к этому моменту значение параметра «временная оценка магнитуды снизу» (BOMC), несущее следующий смысл: по данным на текущий момент магнитуда землетрясения уже не менее BOMC, но может стать еще больше. Для целей оценки цунамигенности такая модификация задачи обработки вполне приемлема.

(3) Считалось, что цунамигенность землетрясения достаточно хорошо определяется магнитудой, определенной по поверхностным волнам периодов 10-20 с. Теперь стало ясно, что бывают случаи, когда очаговый процесс происходит относительно медленно, с длительностью 100 с и более, и слабо возбуждает волны таких периодов; в то же время его потенциал возбуждения цунами велик. Данная проблема может быть в принципе решена путем перехода к оценкам мощности очага на относительно длинных периодах волн, 50-100 с и более; при этом может использоваться «магнитуда по мантийным волнам» Мм и ее аналоги. Можно предполагать, что использование широкополосной цифровой аппаратуры создаст предпосылки для решения этой проблемы.

(4) Считалось, что первые вступления – волны Р от цунамигенного землетрясения - всегда приходят на фоне низких сейсмических шумов. Часто это так; но случается, что цунамигенное землетрясение предваряется мощными форшоками с опережением в несколько десятков секунд, что делает выделение вступления Р (и тем более S) крайне затруднительным. Возможное частичное решение – это использование малых групп приборов и обработка групповыми методами. Проблема требует проработки.

Функции и задачи СН СПЦ

Основным назначением системы сейсмологических наблюдений в СПЦ (СНСПЦ) является оценка возможности возбуждения волны цунами сильным землетрясением на основе обработки кинематических и динамических характеристик сейсмических сигналов. При этом, основная проблема состоит в своевременной выработке сигнала предупреждения и тревоги о возможности волны цунами от землетрясений в ближней зоне (до 200 км от очага землетрясения до защищаемого СПЦ участка побережья или населенного пункта).

Сеть сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России для СПЦ, оснащенная адекватными средствами, методами, алгоритмами обработки и передачи данных должна выполнять следующие основные функции.

1. Научно-технические и информационные:

- обнаружение и регистрацию землетрясений в зоне ответственности: под дном акватории Тихого океана, включая Японское, Охотское, Берингово моря и на прилегающей суше, в круглосуточном непрерывном режиме;
- обработку сейсмических сигналов в автоматическом и автоматизированном режиме с целью быстрой оценки параметров сильных землетрясений ($M > 6.0$) в зоне ответственности для случаев одиночной станции, локальной группы станций, и сети станций;
- принятие решения о возможности цунами по одной станции, по локальной группе станций, по сети станций;
- обмен данными наблюдений с российскими и международными сейсмологическими центрами и центрами предупреждения о цунами;
- сбор, накопление и систематизация данных сейсмологических наблюдений, обобщение и анализ записей цунамигенных землетрясений в целях развития научно-методического и информационного обеспечения СПЦ.

2. Организационные:

- передачу результатов обработки сейсмологических данных службам МЧС и Росгидромет на локальном, региональном и федеральном уровне;
- передачу сигналов предупреждения о цунами на локальном, региональном и федеральном уровне по схеме оповещения служб МЧС и Росгидромет.

Для обеспечения решения перечисленных задач, сеть сейсмологических наблюдений, средств обработки и передачи данных для СПЦ должна развиваться по следующим направлениям.

- Повышение эффективности оперативного прогноза цунами по сейсмологическим данным на Дальнем востоке Российской Федерации (основная задача).
- Непрерывный сейсмический мониторинг территории Дальнего Востока Российской Федерации и мира.
- Научно-исследовательские работы в области создания информационного и методического обеспечения развития системы сейсмологических наблюдений, средств обработки и передачи данных для СПЦ с целью повышение оперативности, надежности и достоверности обнаружения и распознавания цунамигенных землетрясений.

Структура сети сейсмологических наблюдений

Сеть сейсмологических наблюдений (рис. 1) для СПЦ должна включать в себя: сейсмические станции (СС); систему связи для передачи данных; информационно-обрабатывающие центры данных сети сейсмических станций (ИОЦ); оконечные устройства системы оповещения о возможности цунами.

Сейсмические станции. Основу системы сейсмологических наблюдений для СПЦ должны составлять сейсмические станции, созданные специально для решения задач обнаружения землетрясений, оценки их цунамигенности и выработки решения о возможности цунами.

К специализированным сейсмическим станциям СПЦ предъявляются повышенные требования по непрерывности работы (горячее резервирование, дублирование основных узлов оборудования), по качеству и достоверности исходных сейсмических данных и результатов их обработки (качество и надежность датчиков сейсмических сигналов и их адекватная установка), по квалификации персонала, по устойчивости к сильным сейсмическим воздействиям.

Кроме данных специализированных сейсмических станций СПЦ в решении задачи оперативного прогноза цунами могут и должны использоваться данные доступных в реальном времени станций имеющихся региональных и локальных сетей сейсмологических наблюдений (ССН) ГС РАН и (или) результатов их обработки. Все специализированные сейсмические станции СПЦ должны быть оснащены:

- однотипными широкополосными датчиками сейсмических сигналов;

- однотипными оборудованием, методами, алгоритмами и программным обеспечением цифровой регистрации и обработки сейсмических данных в автоматическом и автоматизированном режимах;
 - окончательными устройствами системы связи для передачи исходных сейсмических данных и результатов их обработки в региональные информационно-обрабатывающие центры;
- окончательными устройствами локальной системы оповещения населенного пункта о возможности цунами;
- системой бесперебойного энергоснабжения.

В зависимости от предъявляемых функциональных требований специализированные сейсмические станции для СПЦ можно разделить на два типа: вспомогательные (региональные) и базовые (опорные). Характерные особенности вспомогательных и базовых сейсмических станций заключаются в следующем. *Назначение.* Вспомогательная сейсмическая станция СНСПЦ в основном предназначена для защиты населенных пунктов или участков побережья от локальных цунами с относительно низкой цунами опасностью, для дополнения СНСПЦ с целью ее оптимизации.

Базовая сейсмическая станция СНСПЦ предназначена для защиты населенных пунктов, ответственных объектов или участков побережья от локальных цунами с высокой цунами опасностью, составляет основу СНСПЦ.

Комплект оборудования. Вспомогательная сейсмическая станция СНСПЦ должна быть, как правило, оснащена 2-мя широкополосными трехкомпонентными датчиками сейсмических сигналов (велосиметр, акселерометр).

Базовая сейсмическая станция СНСПЦ должна представлять собой сейсмическую группу с размерами 15-25 км или более. Центральный пункт группы должен быть оснащен широкополосным велосиметром и акселерометром; выносные пункты только акселерометром; центральный пункт должен быть оснащен системой сбора и обработки сейсмологических данных в автоматическом и автоматизированном режимах, а также системой технологической связи с выносными пунктами.

Выполняемые функции. Вспомогательная сейсмическая станция СНСПЦ должна обеспечивать сейсмическими данными СПЦ на уровне принятия решения о возможности цунами по сети станций, должна обеспечивать распознавание сильных землетрясений в автоматическом режиме и давать предупреждение в локальную систему оповещения населенного пункта о происходящем сильном землетрясении.

Базовая сейсмическая станция СНСПЦ (только по своим данным) должна: обеспечивать принятие решения о возможности цунами от землетрясений в ближней зоне (до 200 км) в автоматическом и автоматизированном режиме. Давать предупреждение в локальную систему оповещения населенного пункта о происходящем сильном землетрясении и возможности цунами, должна обеспечивать сейсмическими данными СПЦ на уровне принятия решения о возможности цунами по сети станций.

Режим работы. Вспомогательная сейсмическая станция СНСПЦ должна работать в непрерывном автоматическом режиме, постоянное присутствие персонала не требуется.

Базовая сейсмическая станция СНСПЦ должна работать в непрерывном автоматическом и автоматизированном режимах с постоянным круглосуточным присутствием высококвалифицированного персонала.

Основными параметрами систем наблюдений в сейсмологии являются: количество станций, геометрическая конфигурация их сети, характеристики мест установок отдельных станций, частотные характеристики сейсмометрических каналов, их динамический диапазон и коэффициент преобразования. В силу причин экономического характера число станций в СНСПЦ ограничено, что, в свою очередь, требует решения задачи оптимального планирования такой сети.

Число сейсмических станций СНСПЦ, необходимых для надежного принятия решения о возможности цунами, определяется требованиями к решению обратной задачи в полном объеме – оценка основных параметров землетрясений по записям сейсмических сигналов сетью сейсмических станций. В отложенном режиме она обычно решается по записям 15-40 станций на большом удалении от очага. Но этот подход неприемлем в задаче предупреждения о цунами по причине малого резерва времени – менее 10 минут. Поэтому приходится рассчитывать на использование только близких станций. Хотя принципиально использование нескольких десятков станций вблизи очага могло бы дать относительно более надежные результаты, такой подход с экономической точки зрения не реален. В качестве разумного компромисса можно говорить о

расположении в пределах Дальнего Востока России 15-25 станций, из которых 10-12 должны быть вблизи возможных эпицентральных зон цунамигенных землетрясений, и иметь высокую живучесть, а остальные могут быть обычного регионального типа. При этом в непосредственной окрестности очага конкретного землетрясения обычно будут оказываться 3-5 станций. На рис. 2 показана планируемая схема размещения специализированных сейсмических станций СПЦ на территории Дальнего Востока России и станций глобальной цифровой сети IRIS, привлечение которых необходимо для уточнения решения о возможности цунами.

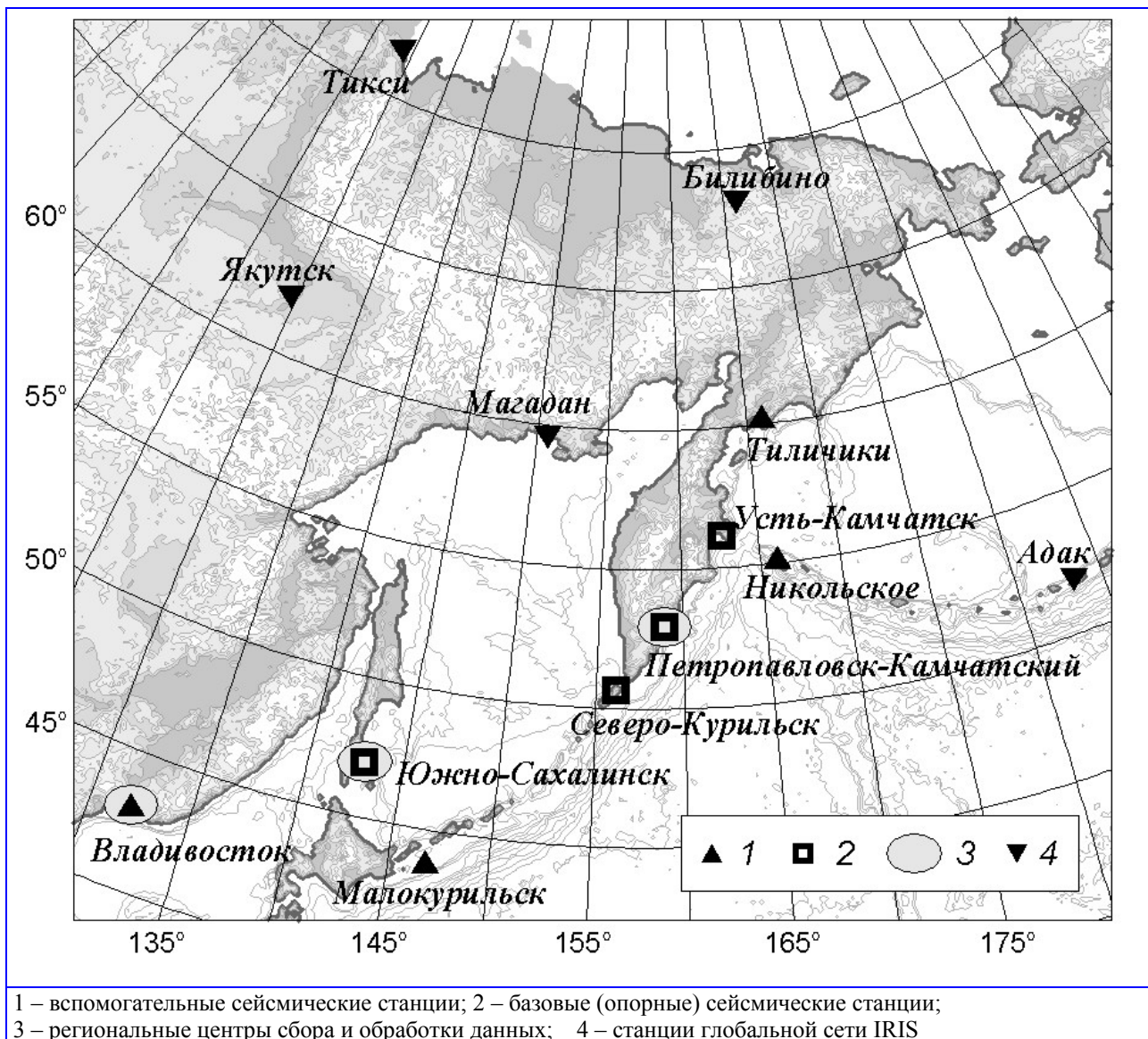


Рис. 2 Система сейсмологических наблюдений для СПЦ с привлечением станций глобальной сети IRIS для уточнения решений о возможности цунами

Необходимые исходные данные для выработки предупреждения о цунами – это данные непрерывной 3-компонентной регистрации движений грунта в широком диапазоне периодов (полоса частот не менее 0.01-20 Гц.). Принципиально важно обеспечить достаточный динамический диапазон системы (не менее 120 Дб). Она должна без искажений регистрировать ускорения грунта до 1000-2000 см/с² и скорости до 200 см/с и при этом обладать достаточной живучестью и вибростойкостью, механически выдерживая упомянутые ускорения и не создавая перекрестных помех по компонентам. Максимально возможные сейсмические сигналы способны зарегистрировать без искажений только акселерометры. Для решения задач предупреждения о цунами совместно с выполнением контроля сейсмичности региона в целом каждая сейсмическая станция должна быть оснащена велосиметром с возможностью регистрации слабых и умеренных

сейсмических сигналов и акселерометром для обеспечения регистрации максимально возможных сейсмических сигналов (до 2g).

Для решения задач СПЦ целесообразно использовать скважинные датчики. Герметизированная скважина характеризуется малыми вариациями температуры и давления, которые в полосе частот датчика являются обычными источниками шума. Вариант установки датчиков в скважине также предпочтителен и по причинам существенного уменьшения (20 дБ на 15-20 м) поверхностных антропогенных сейсмических помех. Кроме этого стоимость создания скважины меньше, чем стоимость работ по строительству сооружений с адекватными условиями по вариациям температуры и давления, необходимых для создания благоприятных условий работы широкополосных сейсмометров. Датчики должны выбираться в исполнении для мокрых скважин с возможной высотой столба воды 25 метров.

Для использования в составе сейсмических станций для СПЦ предлагаются датчики компании Güralp. Для канала по скорости в максимальной мере основным требованиям удовлетворяет широкополосный электронный сейсмометр CMG-3ESPC. Для канала по ускорению будет использоваться форс-балансный акселерометр типа CMG-5. Акселерометры поставляются как в скважинном исполнении, так и для установки на постамент.

Базовые и вспомогательные сейсмические станции СНСПЦ должны размещаться в первую очередь на имеющихся стационарах Геофизической службы РАН и в тех населенных пунктах, где потенциальные очаги цунамигенных землетрясений находятся в непосредственной близости от данного населенного пункта, к таким пунктам первую очередь относятся поселки Северо-Курильск, Усть-Камчатск, Никольское, Малокурильское. Кроме этого базовые сейсмические станции СНСПЦ должны совмещаться с региональными информационно-обрабатывающими центрами Геофизической службы РАН и центрами СПЦ Росгидромета на Дальнем Востоке России.

Система аварийного энергоснабжения на каждой вспомогательной, базовой станции и ИОЦ должна включать в себя два уровня. Первый уровень строится на аппаратуре бесперебойного питания, к которой подключены все элементы станции: регистратор, сервер, рабочее место оператора и т.д. Время поддержания работоспособности элементов сети средствами первого уровня должно быть не менее 12 часов. Второй уровень строится на автономных электродизельгенераторах, их мощность в каждом случае рассчитывается с учетом обеспечения аварийного освещения, отопления помещений и других бытовых нужд.

Система связи для передачи данных. Особенностью сейсмической обработки является то, что данные многих станций должны обрабатываться совместно для получения параметров очагов землетрясений (координат эпицентра, глубины, магнитуды и др.). Это приводит к необходимости организации передачи данных сейсмических станций в региональные информационно-обрабатывающие центры в масштабе реального времени. Режимы передачи и объем передаваемых данных определяются в первую очередь задачами системы наблюдений (является ли она специализированной сетью для прогноза цунами или выполняет также другие функции сейсмического мониторинга), однако в сильной степени зависят также от технических возможностей, существующих в данной стране или регионе. В конкретных экономико-географических условиях Дальневосточного региона полномасштабная система передачи данных, обеспечивающая непрерывный режим передачи полной трехкомпонентной сейсмограммы от сейсмостанций к центру обработки, может быть построена лишь на основе спутниковых каналов связи.

Требуемая пропускная способность канала связи для передачи полного объема данных:

для вспомогательной станции не менее, кбит/с	32.0
для базовой станции не менее, кбит/с	64.0

Для повышения системной надежности целесообразно предусматривать резервные каналы связи (телефонные, телеграфные, телексы, радиоканалы в УКВ и КВ диапазонах), удовлетворяющие требованиям по надежности, коэффициенту готовности и времени доступа к каналу для передачи основных параметров сейсмического сигнала (времена вступления продольной и поперечной волн, максимальные амплитуды и периоды записи). В этом варианте объем передаваемых данных снижается на 4-5 порядков, составляя не более 50-100 байт на событие, с сохранением, однако, повышенных требований по срочности (задержки не более 1-2 мин) и коэффициенту готовности канала (не менее 0.99).

Информационно-обрабатывающие центры данных по сети сейсмических станций. С точки зрения решения главной задачи СПЦ – оперативного прогноза цунами – для обработки в

реальном масштабе времени автоматически должны выбираться только сильные события с магнитудой более установленного порогового значения ($M > M_{пор}$). С другой стороны, быстрое получение данных по возможно большему числу региональных событий обеспечит эффективное решение вторичных задач СНСПЦ. Очевидно, что оптимальное сочетание обеих задач в рамках одной системы является далеко не простым делом. На первом этапе следует ограничиться обеспечением наилучших условий для решения главной задачи СПЦ и по мере ее реализации переходить к решению других задач.

В настоящее время пороговое значение магнитуды ($M_{пор}$) для выпуска тревоги цунами по Курило-Камчатской зоне принято равным 7.0. Такие землетрясения являются достаточно редкими событиями и в этой зоне происходят в среднем 1-2 раза в год (по данным за 1950-2005 гг.). По службе срочных донесений в обработку вовлекается значительное число более слабых землетрясений ($M > 4.0$).

Система обработки СН СПЦ может быть централизованной и распределенной. В условиях Дальнего Востока РФ система обработки сейсмологических данных должна строиться на основе региональных информационно-обрабатывающих центров (ИОЦ) Геофизической службы РАН. Региональные ИОЦ в гг. Петропавловск-Камчатский и Южно-Сахалинск должны одновременно (параллельно) решать задачу о возможности возникновения цунами по данным всех сейсмических станций вовлеченных в службу предупреждения о цунами. На данном этапе развития системы сейсмологических наблюдений для СПЦ целесообразно в г. Владивосток организовать прием и обработку данных в автоматическом режиме на базе центра СПЦ Росгидромета. Результаты обработки всех ИОЦ должны автоматически отражаться на ситуационной панели каждого ИОЦ и использоваться для контроля на этапе принятия решения. Реализация такого алгоритма обработки данных и принятия решения о возможности цунами может быть обеспечена при условиях создания равного и полного доступа всех ИОЦ к данным всех сейсмических станций и результатам обработки других ИОЦ. По существу речь идет о создании в реальном времени на базе спутниковых каналов связи единого информационного пространства. Это обеспечивает, в том числе, резервирование выполнения функций каждого ИОЦ при выходе его из строя (катастрофическое землетрясение, технические отказы).

Полные данные о землетрясении от всех сейсмических станций ДВ региона в ИОЦ будут получены на 3-5 минут позже, чем оно будет зарегистрировано на ближайшей к его гипоцентру станции. Таким образом, наиболее достоверное решение о возможности возникновения цунами будет получено с задержкой не менее 5-10 минут по сравнению с моментом принятия решений на ближайших к гипоцентру землетрясения вспомогательных и базовых станциях СН СПЦ.

В связи с крайне неравномерным распределением во времени числа событий, поступающих на вход системы, необходимо выделять несколько уровней обработки, различающихся по режиму, времени и частоте выполнения, набору используемых данных, программных средств и необходимых вычислительных ресурсов, степени необходимого участия операторов. Можно выделить пять основных уровней обработки.

1) Предварительная обработка сейсмических сигналов (адаптивная оптимальная фильтрация с целью увеличения соотношения сигнал/шум, поляризационный анализ и др.). Контроль работоспособности сейсмометрических каналов. Уровень 1 должен выполняться автоматически в режиме *реального времени*.

2) Выделение сигналов о сейсмическом событии по каждому из поступающих в ИОЦ каналу сейсмических данных и определение некоторого набора параметров выделенных сигналов (время вступления, преобладающий период, амплитуда и др.). Уровень 2 должен выполняться автоматически в режиме *реального времени*.

3) Ассоциация выделенных сейсмических фаз, декларация события, первое (предварительное) определение его основных параметров (время, координаты очага, магнитуда), проверка географического и магнитудного критериев с целью выделения потенциально цунами опасных событий. Этот уровень должен выполняться в автоматическом и/или автоматизированном режиме *квази-реального времени* (допустимы задержки от начала регистрации землетрясения на станции до старта уровня 3 на время не более 1-2 мин, при этом недопустимым является образование в системе очередей необработанных событий).

4) Уточнение основного набора параметров (в частности, глубины очага и магнитуды) по сети станций для всех достаточно сильных (с магнитудой $M > M_{тр}$, где $M_{тр}$ – тревожный уровень магнитуды) региональных землетрясений, определение дополнительных критериев и признаков цунамигенности. Оценка цунами опасности землетрясения по совокупности сейсмологических

критериев (в первую очередь критерия $M > M_{пор}$). Принятие решения в интерактивном срочном режиме о выдаче сигнала "Тревога цунами". Допустимое время от начала регистрации землетрясения на станции на выполнение всех операций - не более 7 мин. Основной режим обработки – автоматизированный (с участием оператора).

5) Уточнение всех параметров землетрясения с привлечением данных станций мировой сети. Передача результатов обработки в ТЦПЦ и в центры СПЦ Японии, США и др. Должен выполняться в автоматизированном режиме. Допустимое время от начала регистрации землетрясения на станции - не более 20 мин.

Принципы построения и функционирования СПЦ предполагают два режима ее работы – *типовой* и *тревожный*. Очевидно, что первый, второй и третий уровни соответствуют типовому режиму, переход к четвертому (и далее, к пятому уровню) означает переход к тревожному режиму. Требование быстрого определения параметров событий, происходящих в случайные моменты времени, влечет за собой необходимость организации обработки 1-3 уровней в режиме реального времени. События, возникающие в случайные моменты времени, должны обрабатываться последовательно, один за другим, в порядке их поступления на вход системы. Время выполнения обработки должно быть сопоставимо с максимально возможной частотой событий. Последнее условие налагает жесткие требования на быстродействие алгоритмов, используемых для первоначальной оценки параметров происходящих событий, невыполнение которых может приводить к созданию очередей необработанных событий, что применительно к задачам СПЦ является недопустимым.

Предупреждение о цунами при очагах сильных землетрясений в ближней зоне

Задача предупреждения о локальном цунами, когда сильное землетрясение происходит под дном океана в непосредственной близости от берега (до 200-250 км), может быть решена быстро (но неизбежно с существенно неполной достоверностью), по заведомо ограниченными данным специализированной сейсмической станции, которая размещена непосредственно в защищаемом пункте или его окрестностях. Время задержки от начала регистрации землетрясения на станции до принятия решения о возможности цунами (коротко - время реакции) на основе оценок эпицентра и магнитуды произошедшего землетрясения, необходимое специализированной сейсмической станции СПЦ включает в себя ряд составляющих. Время формирования очага цунамигенного землетрясения (не менее 30 с; в типичных случаях 110 с; в отдельных случаях до 550 с). Время запаздывания информативных групп сейсмических волн (поперечные волны, поверхностные волны Релея и Лява) от момента вступления Р-волн (определяется расстоянием от очага до станции, а именно: 32 с при расстоянии 200 км, 48 с при расстоянии 300 км, 80с при расстоянии 500 км, 160 с при расстоянии 1000 км; принято: групповая скорость волны Релея 3.5 км/с, средняя скорость Р-волн 8 км/с). Время формирования на записи признаков цунамиопасности, в первую очередь максимума в группе поверхностных волн (не менее 40 с, в типичном случае 100 с, в отдельных случаях до 200с и более). Время для обработки сейсмического сигнала, анализа информативных параметров и выдачу сигналов оповещения (до 45 с).

Для уменьшения времени реакции должны быть разработаны специализированные методики, алгоритмы и программное обеспечение.

Выработанные на специализированной сейсмической станции СПЦ сигналы тревоги должны передаваться в подразделения МЧС России, в локальную систему оповещения населения и в администрации соответствующего уровня об опасности цунами в автоматическом режиме.

Основные подходы выработки сигналов предупреждения о цунами в условиях жесткого дефицита времени при очагах сильных землетрясений в ближней зоне следующие.

1. Использование быстрых оценок уровня амплитуд колебаний или автоматизированной оценки макросейсмической интенсивности («балльности») на основе специализированных методов анализа по неполным данным одной трехкомпонентной широкополосной станции или группы станций, и принятие решений, при необходимости, только на этой основе. В [6, 9] по результатам исследований 124 случаев появления цунами от сильных землетрясений Дальнего Востока России в 1952 – 1976 гг. было показано, что вероятность возникновения цунами в населенном пункте или участке побережья, где проявляется осязательное землетрясение растет с ростом интенсивности сотрясений. При интенсивности сотрясений $I = 6-7$ баллов по шкале *MSK-64* –цунами возникает в 6 случаях из 10; $I = 7-8$ баллов - в 9 случаях из 10. В ходе выполнения работ в 2007 г. Поплавским А.А. по данным каталога за период времени 1737 – 1997 гг. было показано, что при интенсивности сотрясений $I > 7$ баллов вероятность возникновения

цунами с высотой заплеска $h > 1$ м более 0.7. Оперативная оценка по записи станции факта сильного землетрясения вблизи нее с определенной макросейсмической интенсивностью требует проработки. Кроме того, нужно отсеять случаи очень близких толчков магнитуд 4.5-5.5, длительность колебаний при которых мала.

2. Использование в крупных населенных пунктах или на объектах повышенной ответственности сейсмических групп (базовых сейсмических станций). По данным сейсмической группы может быть обеспечена относительно быстрая локация очага землетрясения, существенно более надежная, чем по данным одиночной станции.
3. Использование данных региональных сетей сейсмических станций. Региональные сети сейсмических станций на Дальнем Востоке России при условии доступа к их данным в реальном масштабе времени могут быстро дать дополнительную информацию о положении очага землетрясения. В настоящее время это возможно в первую очередь на Камчатке, где имеется радиотелеметрическая сеть.
4. Использование знаний о пространственно-временных закономерностях распределения очагов сильных землетрясений в Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне.
5. Организационно-административные мероприятия по обучению и тренировке населения направленные на повышение готовности к действиям при угрозе цунами. В частности, население и администрация прибрежного населенного пункта, ощутив землетрясение с интенсивностью сотрясений 7 и более баллов по шкале MSK-64, должны начать эвакуацию немедленно, не дожидаясь прихода тревожного сообщения от СПЦ.

Каждая специализированная сейсмическая станция и сеть сейсмологических наблюдений СПЦ в целом должны работать в итеративном режиме, многократно уточняя оценки параметров землетрясений на каждой итерации в соответствии с полученной на данный момент новой информации. Первые оценки, необходимые для принятия решения о возможности цунами на локальном уровне, должны быть получены в течение не более чем 1-3 минуты после начала регистрации землетрясения.

Последовательность действий системы сейсмологических наблюдений при объявлении тревоги цунами на локальном уровне при очагах в ближней зоне.

1. Выдача сигнала оповещения о возможности цунами в автоматическом режиме на основании первой оценки интенсивности землетрясения по регистрируемым амплитудам сейсмических сигналов волн Р и/или S на специализированной вспомогательной или базовой сейсмической станции СПЦ, расположенной на территории защищаемого пункта или в его окрестностях. Задержка не более 1-2 мин.
2. Подтверждение или отмена сигнала о возможности цунами в автоматическом и/или автоматизированном режиме на основании уточнения оценки интенсивности землетрясения по другим группам сейсмических волн и предварительной оценки координат и магнитуды землетрясения по данным специализированной вспомогательной или базовой сейсмической станции СПЦ, расположенной на территории защищаемого пункта или в его окрестностях. Задержка не более 3-7 минут в зависимости от эпицентрального расстояния и магнитуды землетрясения.
3. Подтверждение или отмена сигнала о возможности цунами в автоматическом и/или автоматизированном режиме на уровне регионального ИОЦ на основании уточнения оценок координат и магнитуды землетрясения по данным региональной (ближайших 3-4 станций) сети специализированных сейсмических станций СПЦ. Задержка не более 7 мин.
4. Подтверждение или отмена сигнала о возможности цунами в автоматизированном режиме на уровне регионального ИОЦ на основании уточнения оценок координат и магнитуды землетрясения по данным сети специализированных сейсмических станций СПЦ Дальнего Востока России с привлечением данных цифровых сейсмических станций региональных и мировых сейсмологических наблюдений. Задержка не более 20 мин.

Выводы

Рассмотрены исходные данные и требования к развитию системы сейсмологических наблюдений для службы предупреждения о цунами, ее функции и задачи.

Предложена структура СНСПЦ. Проведена проработка общих технических и методических решений и средств, обеспечивающих повышение эффективности оперативного прогноза цунами по сейсмологическим данным на Дальнем востоке Российской Федерации

и непрерывный сейсмический мониторинг территории Дальнего Востока Российской Федерации и мира.

Реализация разработанных в рамках выполнения мероприятия 18 ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года» технических предложений должна обеспечить:

повышение защищенности от воздействия цунами населенных пунктов, расположенных на побережьях полуострова Камчатка, на Курильских островах, на побережье Японского моря (прибрежные поселки Приморского края);

уменьшение задержки времени на оповещение населения о возможности цунами по сейсмологическим данным от начала регистрации землетрясения до 3 минут на локальном уровне, 7 минут на региональном уровне, не более 20 минут на межрегиональном уровне;

снижение числа ложных тревог цунами.

Исследования, по материалам которых написана данная работа, поддержаны грантами РФФИ 07-05-13583, грантом Сибирского отделения РАН 2006-113.

Список литературы

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР, М., Наука, 1974, с. 245
2. Кирнос Д.П., Рыков А.В. Специальная быстродействующая сейсмическая аппаратура для оповещения о цунами // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР, 1961, № 9, С.56-66.
3. Левин Б. В. Физика цунами и родственных явлений в океане /Янус-К, 2005.360с.
4. Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. – М.: Наука. 1988. 128 с.
5. Поплавский А.А. Храмушин В.Н., Непоп К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. - Южно-Сахалинск: ДВО РАН. 1997. 273 с.
6. Поплавская Л.Н. Использование инструментальных и макросейсмических данных для оперативной оценки цунами: автореферат ... канд. физ.-мат. наук —М., 1984. — 24 с.
7. Саваренский Е.Ф. Проблема цунами // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР, Сборник статей по цунами, 1956, № 2, С.3-7.
8. Соловьев С.Л. Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Труды СахКНИИ, вып.29. Волны цунами. Южно-Сахалинск, 1972. С.7-47.
9. Соловьев С.Л., Поплавская Л.Н. Оценка цунамиопасности близкого землетрясения по наблюдаемому макросейсмическому эффекту // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. — 1982. — №11. — С. 87—91.
10. Gusiakov V.K., Kalashnikova T.V., Khidasheli D.G., Marchuk An.G. Analysis of the tsunami travel time maps for damaging tsunamigenic earthquakes in the World Ocean // Joint Report of the NTL/ICMMG and WAPMERR for the IOC/UNESCO, Novosibirsk-Geneva, 2006.
11. ITSU Master Plan, IOC/INF-1124, Paris, UNESCO, 1999, 34 pp.
12. Koya M., H. Sakoi, J. Funasaki Monitoring of Earthquakes in the Hokkaido Area, Provision of Earthquake and Tsunami Information and Recent Seismic Activity in the Hokkaido Area // 5-th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5). Abstracts. Japan. Sapporo. 2006. P. 18-20.
13. Sokolowski T., Whitmore P.M., Jorgensen W. Alaska tsunami warning center's automatic and interactive computer processing system. // Pure and Appl. Geoph., 1990, V.134, № 2, P.163-174.
14. Tatehata H. The new tsunami warning system of the Japan Meteorological Agency. // “Perspectives on Tsunami Hazard Reduction” (G.Hebenstreit, Ed). Kluwer Academic, Dordrecht. 1997. Pp.175-188.
15. TREMORS (Tsunami Risk Evaluation through Seismic Moment from a Real-time System). // Laboratoire de Geophysique, Bruyeres-le-Chatel, France. 1995.