УДК 550.34:004.94:534.6

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ: АКТУАЛЬНОСТЬ, НЕОБХОДИМОСТЬ СОЗДАНИЯ

AUTOMATED PUBLIC EARTHQUAKE WARNING SYSTEM: TOPICALITY AND RELEVANCE OF ITS DEVELOPMENT

Владимир Андреевич Акатьев¹, Данил Юрьевич Грязнев¹, Сергей Владимирович Акатьев², Игорь Иванович Зенцов³

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² АО «Сибирская угольная энергетическая компания», Москва, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

Vladimir A. Akatev¹, Danil Yu. Gryaznev¹, Sergey V. Akatev², Igor I. Zentsov³

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
 ²Siberian Coal Energy Company JSC, Moscow, Russia
 ³All-Russian Science Research Institute of Civil Defence and Emergencies of EMERCOM (Federal Center of Science and High Technologies),
 Moscow, Russia

e-mail: akatiev07@mail.ru

Аннотация. Российская Федерация в целом характеризуется умеренной сейсмичностью. Однако более 20 % территории подвержено сейсмическим воздействиям интенсивностью 6–7 баллов по 12-балльной



макросейсмической шкале MSK-64, что представляет определенную угрозу особенно для европейской части страны с высокой плотностью населения, и около 5 % территории относится к сейсмоопасным зонам, интенсивность сейсмических сотрясений в которых может достигать 8–9 баллов, в таких зонах проживают около 2 млн человек. Кроме того, расширяется география природно-техногенных землетрясений за счет таких районов, где развивается добыча углеводородов, твердых полезных ископаемых, происходит извлечение подземных вод, выполняется закачка воды или жидких отходов, производится заполнение водохранилищ и пр. При сильных землетрясениях нередко возникают разрывы (разломы) суши, представляющие существенную опасность для инженерных сооружений, в частности для линейных протяженных объектов, таких как магистральные трубопроводы, железные и автомобильные дороги. На современном этапе развития технологий одним из самых эффективных и действенных инструментов по снижению ущерба от землетрясений и оперативной оценке инженерной обстановки становятся системы раннего предупреждения о землетрясениях, в которых время упреждения (прогнозирования) равно временному интервалу между вступлением в защищаемую зону продольной и поперечной сейсмических волн. При периоде упреждения не менее 1 мин можно существенно уменьшить людские потери и материальный ущерб в защищаемой зоне, обеспечив эвакуацию людей из зданий и перевод производственных объектов на безопасные режимы функционирования. В случаях, когда интервал времени менее 1 мин, но более 40 с, также можно снизить риски от землетрясений, обеспечив эвакуацию людей с первых этажей зданий.

Проанализированы зарубежные системы раннего предупреждения о землетрясениях. Обоснована актуальность и необходимость создания автоматизированной системы раннего предупреждения о землетрясениях для Камчатского региона России. Предложена структура системы, определена концепция ее построения, ключевые функции, а также



алгоритм функционирования. Рассмотренные решения могут быть использованы при создании и модернизации автоматизированной информационно-управляющей системы АИУС РСЧС-2030, разрабатываемой по заказу МЧС России.

Abstract. The Russian Federation territory has moderate seismic activity. However, more than 20% of territories undergone seismic impacts with the intensity of 6-7 points from 12 degrees according to macroseismic MSK-64 scale. This represents certain threat for European part of the country with high population density. Moreover, nearly 5% of the territories are seismic zones where seismic impacts' intensity can reach 8-9 points, and almost two million people live in these zones. Aside from that, the geography of natural and man-made earthquakes is expanding due to areas with hydrocarbon, solid minerals, and groundwater extraction, water or liquid waste load, and reservoir filling, etc. Land fractures (break up) often occur during severe earthquakes that can be extremely dangerous for engineering constructions, and particularly for linear extended objects such as main pipelines, railways, roads, and highways. One of the most efficient and effective tools for earthquake damage reduction and prompt estimation of the engineering situation is earthquake early warning systems. In these systems delay time (prediction time) is equal to the time between the entry of p-waves and s-waves into the protected zone. We can significantly reduce human and property losses in the protected area with a delay time of at least 1 minute, as we can ensure people evacuation from buildings and manufacturing facilities turn to safe modes. We still can reduce the risks from earthquakes in cases where the time interval is less than 1 minute but more than 40 seconds by ensuring people evacuation from ground floors of buildings.

Foreign earthquake early warning systems were analyzed. The relevance and the need of the automated earthquake early warning system for Kamchatka region of Russian Federation is justified. The system structure, its implementation concept, key functions, as well as operation algorithms are defined. These solutions can be used in creation and modernization of the automated management



information system RSChS-2030 developed by the order of Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters.

Ключевые слова: прогноз землетрясения, предвестники, сейсмическая волна, система раннего предупреждения о землетрясении

Keywords: earthquake prediction, precursors, seismic wave, earthquake early warning system

Введение

Сейсмологи ежегодно регистрируют на Земле около 20 тыс. сейсмических событий разной интенсивности. В России на территориях с интенсивностью землетрясений до 8–9 баллов проживают 2 млн человек. Несмотря на применение сейсмоустойчивых технологий при строительстве зданий и сооружений, от крупных землетрясений гибнут тысячи людей.

Для снижения сейсмического риска на таких территориях необходимы надежные оперативные методы предсказания сильных сейсмических событий [1–3]. Так, в Японии, Тайване, Мексике, США, Турции, Греции и Румынии используются системы раннего предупреждения землетрясений (СРПЗ), предназначенные для оповещения по системам мобильной связи соседних регионов о землетрясении в режиме реального времени за 40–180 с до прихода вызывающих разрушения зданий сейсмических волн в контролируемую зону и предупреждения сейсмических рисков для производственных объектов [4–7].

В Российской Федерации такого рода системы развиты недостаточно. Однако наличие системы мониторинга сейсмической и вулканической активности Камчатки и Командорских островов позволяет считать сейсмоактивные территории России, в первую очередь Камчатский регион, в значительной степени подготовленными к созданию СРПЗ [8–13].



Оперативное прогнозирование землетрясений

Краткосрочный прогноз сильных сейсмических событий проводится во всем мире на основе мониторинговых наблюдений за предвестниками землетрясения, проявляющиеся за несколько часов или суток до события [10, 11]. Однако указанные физические процессы, рассматриваемые как предвестники, зачастую происходят по причинам, не связанным с землетрясениями, а по этой причине использование таких прогнозов не обладает необходимой достоверностью. В то же время в некоторых прибрежных странах созданы и действуют комплексные системы раннего предупреждения территорий о скором наступлении сильного сейсмического события. Это стало возможным благодаря уровню развития современных технологий, когда скорость обработки сейсмического сигнала и передачи данных о событии выше скорости распространения сейсмической волны. Так, СРПЗ формирует сигнал о событии, и сейсмические волны через некоторый промежуток времени придут к защищаемой территории.

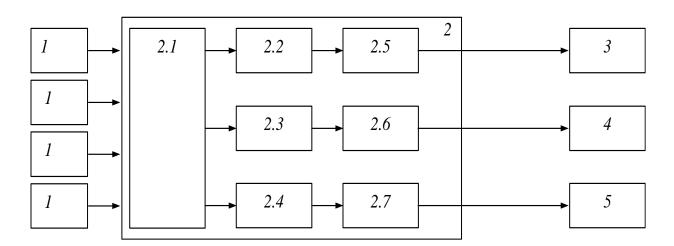
Раннее предупреждение о приходе сейсмической волны возможно осуществить, если время отставания поперечной сейсмической волны от продольной составляет более 40 с, что отмечается при некоторых расстояниях от очага землетрясения до защищаемой территории. В течение этого времени прогнозируется интенсивность события, определяются координаты очага и время вступления сейсмической волны в контролируемую зону. Оповещение населения о подходе сейсмической волны к рассматриваемой территории за 3 с позволяет сократить число человеческих жертв и травм на 14 %, за 10 с – на 39 %, за 20 с – на 63 % [4].

СРПЗ должна включать в себя сейсмические станции 1, центр по расшифровке сейсмограмм и управлению рисками 2 (рисунок 1).

Система (рисунок 1) работает следующим образом. Модуль 2.1 расшифровывает сейсмограммы, полученные от станций 1, и прогнозирует параметры сейсмического события, на основе которых модули 2.2 и 2.3 оценивают риски, а модули 2.5 и 2.6 формируют сигналы на обеспечение



безопасности населения 4 и производственных объектов 3. Одновременно модуль 2.4 оценивает обстановку в контролируемом районе, модуль 2.7 осуществляет обработку, хранение и взаимодействие при обмене информацией с территориальным центром управления в кризисных ситуациях 5.



1 – сейсмические станции; 2 – центр по расшифровке сейсмограмм и управлению рисками; 2.1 – модуль расшифровки сейсмограмм и оценки параметров сейсмического события; 2.2 – модуль оценки рисков производственных объектов; 2.3 – модуль оценки рисков жилого сектора; 2.4 – модуль оценки обстановки; 2.5, 2.6 – модули выработки сигналов реагирования; 2.7 – модуль обработки, хранения и обмена информацией; 3 – производственные объекты; 4 – система мобильного оповещения жителей; 5 – центр управления в кризисных ситуациях (ЦУКС) администрации региона

1 – seismic stations; 2 – center for seismogram interpretation and risk management; 2.1 – module for interpretation seismograms and estimating parameters of a seismic event; 2.2 – module for assessing the risks of production facilities; 2.3 – module for assessing the risks of the residential sector; 2.4 – module for assessing the situation; 2.5, 2.6 – modules for generating response signals; 2.7 – module for processing, storing and exchanging information; 3 – production facilities; 4 – mobile notification system for residents; 5 – Crisis Management Center (CMC) of the regional administration

Рисунок 1. Структура системы раннего предупреждения

Figure 1. Structure of an early warning system



С получением тревожного сигнала предприятия с непрерывным циклом автоматически переводятся на безопасные режимы (пониженные нагрузки, снижение давлений перекачки нефтепродукта, отключение электроэнергии, уменьшение скорости движения транспорта). Жители по мобильной связи оповещаются о приближении сейсмической волны землетрясения с необходимыми рекомендациями отключить газ и электроэнергию перед экстренным выходом из здания.

Расшифровка сейсмограмм

С использованием сейсмограмм можно определить координаты очага землетрясения, временные и другие характеристики зафиксированных сейсмических волн. Так, в сейсмограмме зашифрована информация о продольных P, поперечных S и поверхностных L (Релея LR и Лява LQ) волнах [8, 9].

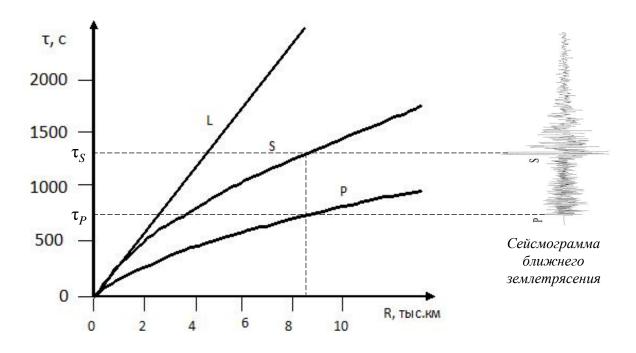
Особенно важно то, что сейсмограмма позволяет оценить время запаздывания поперечной волны по отношению к продольной волне, т.е. время упреждения (до 1–3 мин), необходимое для защиты от вступления поперечной волны сильного события [14–17].

Скорости распространения основных сейсмических волн (продольных P, поперечных S и поверхностных L) в земной коре меньше, чем в нижележащей мантии. Волны, преломляясь, распространяются в мантии на незначительной глубине (вдоль границы с земной корой). Прямые волны приходят только на очень малых расстояниях. Преломленные волны выходят на земную поверхность с запозданием, но, начиная с расстояния около 200 км, обгоняют непреломленные (прямые) волны и приходят в первых вступлениях [18, 19]. Из трех видов одновременно зародившихся в гипоцентре землетрясения колебаний P-волны имеют наибольшую скорость распространения, S-волны обладают меньшей по сравнению с P-волнами скоростью, а L-волны – самые медленные. При этом L-волны распространяются постоянной скоростью, тогда как скорости



распространения P- и S-волн являются функциями от эпицентрального расстояния [13, 18, 19].

Таким образом, можно сделать вывод, что фаза P соответствует вступлению продольных волн, а фаза S – поперечных волн (рисунок 2).



 τ — время; R — расстояние от эпицентра землетрясения; τ_P — время пробега продольной волны от очага до станции; τ_S — время пробега поперечной волны от очага до станции; $(\tau_S - \tau_P)$ — разность между временем прихода P-и S-волн

 τ – time; R – distance from the epicenter of the earthquake; τ_P – longitudinal travel time from the source to the station; τ_S – shear travel time from the source to the station; $(\tau_S - \tau_P)$ – difference between the arrival times of the P- and S-waves

Рисунок 2. Кривые времени распространения сейсмических волн *P, S, L* **Figure 2.** Curves of propagation time of seismic waves P, S, L

Зарубежные системы раннего предупреждения о землетрясении

Большинство систем раннего предупреждения о землетрясениях, таких как американская система ShakeAlert (Геологическая служба США, USGS), используют мгновенные сейсмические данные в реальном времени для определения местоположения и силы землетрясения. Основной задачей



таких систем является быстрый сбор и передача данных с датчиков движения грунта в центры обработки с целью дальнейшего массового оповещения населения. В настоящее время в Калифорнии работает система раннего оповещения о землетрясениях с помощью Android-устройств (новый проект Google). Встроенные в смартфоны датчики движения работают как сейсмометры, и при фиксировании датчиком сейсмической волны телефон отправляет данные о местоположении на сервер обнаружения землетрясений Google [3, 5, 15].

Система раннего предупреждения о землетрясениях Японского метеорологического агентства (JMA) способна определить координаты очага и силу землетрясения и отправить публичные оповещения по средствам массовой информации – и все это примерно за минуту до начала землетрясения. Высокая эффективность такой системы обусловлена большим (более 1 тыс.) количеством сейсмических станций по всей Японии [5].

Во время землетрясения из очага одновременно распространяются продольные (P) и поперечные (S) волны [3, 17]. Временной интервал между приходом волн определяет имеющееся время для эвакуации населения. Сейсмическая станция, находящаяся ближе всего к эпицентру, сначала улавливает P-волны и передает информацию в центр обработки данных, который затем быстро оценивает координаты эпицентра, глубину очага и энергию землетрясения и выдает сигналы оповещения.

Система раннего оповещения Японии при риске цунами обеспечивает выдачу оповещений о цунами. Реализация оповещения о цунами требует на принятие решения более 1 ч времени [5].

В Японии с 1964 года действует система раннего предупреждения производственных объектов, целью которой является обеспечение безопасности указанных объектов в моменты вступления сильных сейсмических волн: переход объектов непрерывного цикла на безопасные режимы работы; отключение электроэнергии и газа; остановка или

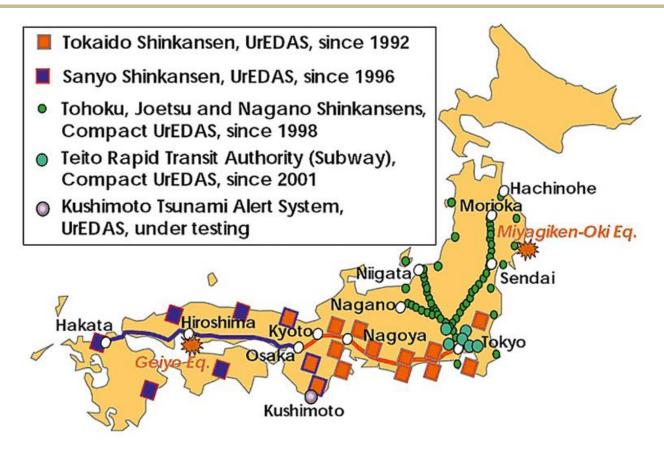


замедление транспорта; снижение давлений в магистральных трубопроводах и др. При этом протяженные коммуникации разбиты на секции длиной 400 км, каждая из которых контролируется системой датчиков [5]. Система раннего предупреждения включается в работу, если один из датчиков покажет превышение порогового ускорения (0,4 м/с²).

Особый СРП3 интерес представляют ДЛЯ транспортных (железнодорожный, автомобильный и трубопроводный транспорт) и канализация, кабельные инженерных (водопровод, сети т.п.) коммуникаций. Для сейсмической защиты протяженных объектов необходимы сейсмические станции вдоль протяженного объекта, установленные с некоторым, как правило 20–30 км, шагом, что позволяет контролировать безопасность всех участков объекта, диагностировать повреждения и определять объем работ по восстановлению участков объекта. Однако для оперативной оценки параметров сейсмического события, угрожающего объекту, не обойтись без установки с некоторым шагом (30-50 км) сейсмостанций вблизи эпицентров возможных землетрясений (например вдоль линии тектонического разлома, где очаги землетрясений). Объединение зарождаются рассмотренных подходов обеспечивает необходимое время упреждения (рисунок 3) [5].

Так, успешно функционирующие в Японии системы экстренного определения и оповещения о землетрясении (Urgent Earthquake Detection and Alarm System, UrEDAS, и Compact Urgent Earthquake Detection and Alarm System, Compact UrEDAS) немедленно оценивают интенсивность землетрясения, определяют районы риска, прогнозируют вероятные последствия землетрясения, могут подавать сигнал тревоги (дальность UrEDAS до 200 км, Compact UrEDAS – до 20 км), инициирует автоматическое торможение поездов.





UrEDAS и Compact UrEDAS — системы экстренного определения и оповещения о землетрясении; Tokaido (Токайдо Синкансэн), Sanyo (Санъё Синкансэн), Tohocu (Тохоку Синкансэн), Joetsu (Дзёэцу Синкансэн), Nagano (Нагано Синкансэн) Shinkansens — линии высокоскоростной сети железных дорог в Японии; Teito Rapid Transit Authority (в наст. время Tokyo Metro) — скоростной внеуличный транспорт (Токийский метрополитен); Kushimoto Tsunami Alert System — система оповещения о цунами Кусимото

UrEDAS and Compact UrEDAS – earthquake emergency detection and warning systems; Tokaido (Tokaido Shinkansen), Sanyo (Sanyo Shinkansen), Tohoku (Tohoku Shinkansen), Joetsu (Joetsu Shinkansen), Nagano (Nagano Shinkansen) Shinkansens – lines of the high-speed rail network in Japan; Teito Rapid Transit Authority (currently Tokyo Metro) – high-speed off-street transport (Tokyo Metro); Kushimoto Tsunami Alert System

Рисунок 3. Сейсмические сети для защиты протяженных объектов в Японии [5]

Figure 3. Seismic networks to protect extended objects in Japan [5]



Российский опыт

Система мониторинга сейсмических событий Камчатки. Из всех сейсмоактивных территорий России наибольший интерес представляет сейсмоактивный Камчатский регион. Большинство зданий и сооружений Камчатки рассчитаны на интенсивность землетрясения 8 баллов, но они выработали свой ресурс. Стратегией социально-экономического развития Камчатского края до 2030 года предусмотрено строительство на Камчатке распределительных газопроводов и железной дороги. Вместе с тем сейсмическая активность вблизи Петропавловска-Камчатского оценивается интенсивностью в 9 баллов с повторяемостью 0.02 год $^{-1}$ [8, Землетрясения наиболее часто происходят в области тихоокеанской сейсмофокальной зоны. Большинство очагов землетрясений находятся на расстоянии 50-70 км от восточного побережья. На расстоянии более 80-100 км от Петропавловска-Камчатского интенсивности землетрясений могут доходить до 7,5-8 баллов. Разница в скоростях продольной и поперечной воли составляет около $v_P - v_S = 2$ км/с. При расстоянии от эпицентра 120 км время упреждения составит 1 мин. Указанный способ прогнозирования времени упреждения не является точным, поскольку не учитывает особенности среды распространения волн [20].

На современном этапе системы раннего предупреждения землетрясений для Камчатского региона могут быть реализованы при проектировании и строительстве линейных коммуникаций, в том числе газопроводных систем, железной и автомобильных дорог. При создании СРПЗ должны быть предусмотрены функции определения интенсивности землетрясений в пределах отдельных участков линейных объектов и автоматизированного выполнения мероприятий по повышению их безопасности.

Камчатская сеть радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС). Сеть предназначена для ведения мониторинга вулканической и тектонической активности Камчатки, о. Беринга, Северных Курил и прилегающей акватории океана. Включает 3 группы станций (куста):

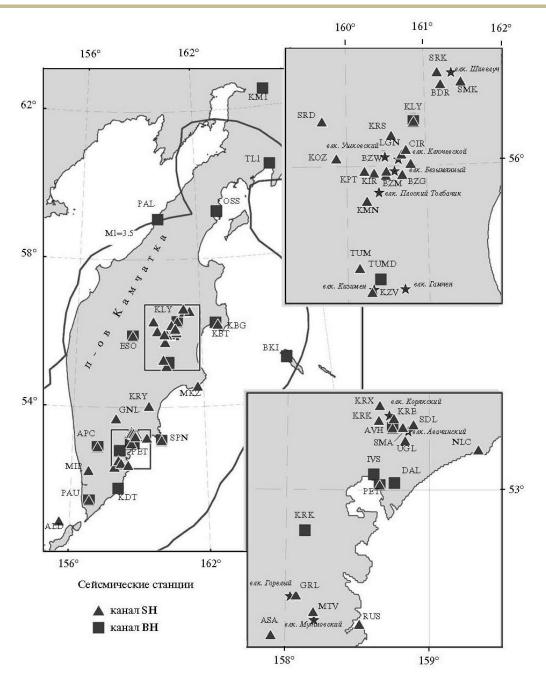


Петропавловская (20 станций), Козыревская (10 станций), Ключевская (9 станций) (рисунок 4) [8, 9]. Все станции Камчатской сети РТСС расположены в труднодоступных местах, работают автономно и обслуживаются раз в 2–3 года.

Сигналы со станций передаются по радиоканалу в режиме реального времени в приемные сейсмологические центры РТСС, расположенные в Петропавловске-Камчатском, Козыревске и Ключах, непосредственно или через ретранслятор. В приемных центрах производится преобразование аналогового сейсмического сигнала в цифровой. Данные со всех станций сети поступают в приемный центр в г. Петропавловске-Камчатском. В Петропавловском центре обработки данных цифровая сейсмическая информация любой станции сети РТСС доступна практически сразу после ее регистрации на приемных центрах. Эта возможность реализуется подключением локальных компьютерных сетей приемных центров к сети Интернет с помощью выделенных телефонных пар. Кроме того, в приемном центре сети РТСС в г. Петропавловске-Камчатском ведется круглосуточное автоматическое определение гипоцентров землетрясений с магнитудой больше 4 из Авачинского залива и больше 5 для всего Камчатского региона. Положение гипоцентра оценивается в течение 15–20 мин. Соответствующая информация автоматически передается по электронной почте в службу срочных донесений (ССД).

Данные оперативного каталога, оперативной оценки магнитуд и положений гипоцентров сильных событий передаются по электронной почте в Геофизическую службу Российской академии наук (ГС РАН). Один раз в сутки строится оперативный каталог для всех зарегистрированных землетрясений. Периодически выполняются обработка циклов калибровок и расчет передаточных функций каналов в виде соответствующих коэффициентов, полюсов и нулей. Эта информация по компьютерной и телефонной связи передается заинтересованным организациям.





На врезках показано размещение станций в районе г. Петропавловска-Камчатского и Ключевской группы вулканов [9]

The insets show the stations location in the area of the city of Petropavlovsk-Kamchatsky and the Klyuchevskaya group of volcanoes [9]

Рисунок 4. Схема размещения сейсмических станций Камчатки, оснащенных короткопериодными (SH) и широкополосными (BH) велосиметрами

Figure 4. Layout of seismic stations in Kamchatka equipped with short-period (SH) and broadband (BH) velocimeters



Инструментарий для проведения наблюдений за предвестниками землетрясений

Геофизические наблюдения. Систематически проводятся наблюдения за уровнем воды в скважинах, выделением газов, химическим составом подземных вод, атмосферным электричеством (свечение, электромагнитные волны, форма облаков).

Для мониторинга концентраций повышенных сейсмических напряжений в тектонических плитах используются высокочувствительные спутниковые радары и геодезические системы Глонасс и GPS. Для дистанционного зондирования Земли используются геостационарные орбиты спутников [12].

Сеть GPS-мониторинга включает в себя девять пунктов непрерывных наблюдений. В каждом пункте размещен приемник типа Z-12 (Ashtech или Topcon) с антенной GEODETIC или ASHDMR.

Регистрация электротеллурических потенциалов проводится на трех пунктах на основе геофизической радиотелеметрической системы передачи данных (ГРТС).

Гидрогеодинамические наблюдения проводятся на двух пьезометрических скважинах и включают синхронную регистрацию изменений уровня воды и атмосферного давления с частотой 10 мин.

Координированный мониторинг электромагнитных и сейсмических сигналов осуществляется Российско-Японской геофизической обсерваторией (обсерваторией «Карымшина») – пунктом комплексных геофизических наблюдений.

На Камчатке наблюдение за изменением параметров геофизических полей непрерывно ведется на станциях регистрации высокочастотного сейсмического шума.

Сейсмические наблюдения. Сеть стационарных сейсмических станций для непрерывной цифровой регистрации сейсмических сильных движений Камчатки расположена вдоль восточного побережья Камчатки на о. Беринга



и на территории г. Петропавловска-Камчатского [8, 9, 12]. Приборы, оборудование размещены на региональных сейсмостанциях, маяках, метеостанциях и т.п.

Существующая Камчатская сеть радиотелеметрических сейсмических станций включает в себя 3 куста станций: Петропавловский, Козыревский и Ключевской. Такое деление обусловлено расположением приемных центров, на которых ведется регистрация сейсмометрической информации соответствующих станций.

Основы оперативного оповещения о землетрясении

Очаг землетрясения генерирует продольные, поперечные и поверхностные сейсмические волны. По параметрам продольной волны система оперативного предупреждения о землетрясении оценивает магнитуду землетрясения и параметры распространяющихся поперечных и поверхностных волн на исследуемой территории. Работа системы основана на следующих процессах.

- 1. Определение координат и энергии очага. Для определения энергии, выделяющейся землетрясения (движение, очаге столкновение тектонических плит) используются спектры продольных волн нескольких (не менее трех) сейсмостанций. По эмпирической модели энергии с расстоянием затухания оценивается интенсивность территории. Модель исследуемой позволяет генерировать оповещения с упреждением прихода поперечной и поверхностной волн.
- 2. Определение магнитуды землетрясения. Магнитуда землетрясения рассчитывается по периоду и пиковой амплитуде смещения грунта первого вступления продольной волны.

Классический способ определения времени распространения разрушающих сейсмических волн на исследуемую территорию основывается на том, что местоположение гипоцентра известно. Эта величина определяется рядом параметров, в том числе геометрическими и



механическими характеристиками среды, ее изменение можно рассчитать с использованием, например, простейшей модели землетрясений с точечным источником. По модели с использованием различных алгоритмов определяется положение гипоцентра землетрясения и сравнивается с точными значениями.

3. упреждения. Очаг Оценка времени землетрясения имеет определенные размеры, которые могут быть связаны с энергетическими параметрами. Если случается катастрофичное землетрясение, то можно оценить размеры разрывов земной поверхности, а по количеству выделяемой энергии оценить размеры его очага. В этом случае, возможно, следует говорить не столько об объеме очага (гипоцентральной области), сколько о линейных размерах разрывов. Таким образом, иногда сложно строго установить гипоцентр, где начинается процесс выделения упругой энергии. Для наиболее сильных землетрясений Японии, Курильских островов и Камчатки размер (протяженность) L очага в километрах от магнитуды M выражается эмпирической зависимостью [18]: $\lg L = 0.39M - 1$.

При магнитудах от 7 до 9 размер очага соответственно равен от 90 до 320 км. Очаг такого землетрясения можно изобразить на карте в виде вытянутого прямоугольника у берегов Камчатки вдоль фокальной зоны [19]. Положение центра очага представляет опасность для Петропавловска-Камчатского. Глубина гипоцентра составляет 25 км [8, 9].

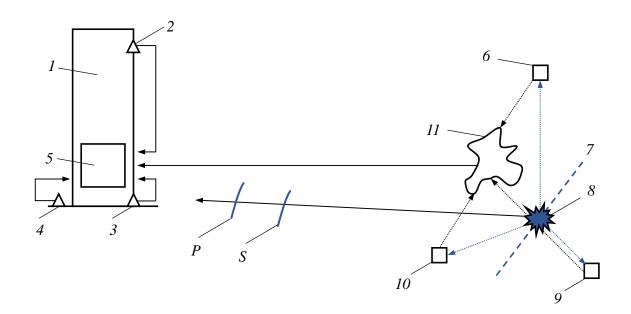
Поскольку очаг представляет собой вытянутую форму, использование любых подходов на основе модели точечного источника неизбежно приведет к грубым ошибкам [19]. Поэтому применяется модель протяженного очага.

Скорости P- и S-волн в однородной изотропной среде определяются формулами, представленными в [21]. При известной глубине гипоцентра землетрясения и заданных численных значениях первого и второго параметров Ламе (λ = 45 ГПа; μ = 40 ГПа), а также плотности (ρ = 3000 кг/м³) по этим формулам можно вычислить значения скоростей прихода



сейсмических волн: $v_P = 6,45$ км/с и $v_S = 3,65$ км/с [21, 22], которые могут быть использованы для оперативного прогноза времени упреждения оповещения. Время до эвакуации для Петропавловска-Камчатского (180 тыс. жителей) при расстоянии от очага землетрясения $\Delta = 120$ км оценивается величиной $\Delta t = 15$ с. Для второго по численности населения города Камчатского края Елизово (38,9 тыс. жителей), находящегося на расстоянии от очага $\Delta = 140$ км, время упреждения составляет $\Delta t \approx 17$ с, для населенного пункта Мильково (7,4 тыс. жителей), расположенного на расстоянии $\Delta \approx 216$ км от очага, — $\Delta t = 26$ с. Полученное время упреждения в целом для полуострова находится в диапазоне значений от 15 до 60 с, что является достаточным для эвакуации людей из зданий.

4. Оперативное оповещение населения на контролируемой сейсмоопасной территории. Автоматизированная система оперативного оповещения людей о землетрясениях на сейсмоопасных территориях создается на основе интеграции данных локальной сейсмической сети и оперативной информации глобальной сети ССД ГС РАН (рисунок 5).



Pисунок 5. Схема контроля и управления оповещением **Figure 5.** Scheme of monitoring and managing notification



На рисунке 5 показаны геофизические станции 6, 9, 10 глобальной сейсмической сети, расположенные вблизи зон возможных землетрясений 8 и тектонических разломов 7. Информация со станций 6, 9, 10 передается в территориальные сейсмологические центры ГС РАН 11, которые фиксируют время, мощность и вычисляют координаты очага сейсмического события. В отдельных зданиях 1 и сооружениях на исследуемой территории могут быть оборудованы точки контроля ускорения грунта 3, 4, содержащие сейсмоприемники. Сейсмодатчики устанавливаются на прочном основании на уровне фундамента сооружения. В здании 1 размещается система 5 мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС), представляющая программно-аппаратный комплекс, осуществляющий сбор, обработку информации о различных параметрах состояния объекта мониторинга, а также передачу сообщений об угрозах.

В нормативном порядке установлены объекты мониторинга инженерных систем: потенциально опасные объекты, здания массового пребывания людей, высотные уникальные сооружения, И пр. Программные средства СМИС позволяют по мере поступления информации о землетрясении выдать сигнал оповещения об экстренной эвакуации людей и проведению мероприятий по повышению безопасности объекта.

Кроме того, в здании могут быть установлены датчики 2, позволяющие проводить измерения амплитудно-частотных характеристик сооружений. На основании полученной информации программные средства СМИС дают возможность определить дефекты здания, полученные при землетрясении и остаточный ресурс здания.

Выводы

На основании существующих систем регистрации землетрясений предложена система оперативного оповещения населения и проведения мероприятий по повышению безопасности объектов. При оборудовании зданий датчиками регистрации амплитудно-частотных характеристик



сооружений программные средства СМИС при их усовершенствовании позволят оценить остаточный ресурс зданий в случае сейсмического воздействия.

Установлено, что время упреждения при землетрясениях для полуострова Камчатка находится в интервале значений от 15 до 60 с, что является достаточным для эвакуации населения из зданий с целью снижения количества пострадавших.

Таким образом, создание системы оперативной оценки сейсмических событий, сейсмостойкости зданий в опасных районах и разработка предложенного программного комплекса оперативного оповещения населения о землетрясениях позволит значительно минимизировать последствия в части количества пострадавших при катастрофических сейсмических событиях.

Предложенный комплекс целесообразно включить в состав автоматизированной информационно-управляющей системы АИУС РСЧС-2030, разрабатываемой с 2014 года МГТУ имени Н.Э. Баумана и Центром исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС) по заказу МЧС России.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-11-2019-087 от 18.12.2019).

Список источников

- 1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. М.: Стандартинформ, 2018. 122 с.
- 2. Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2012 // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 5-20.



- 3. Yanes J. Can Earthquakes be Predicted? // GNS Science. URL: https://www.gns.cri.nz/Home/Learning/Science-
- Topics/Earthquakes/Monitoring-Earthquakes/Other-earthquake-questions/Canearthquakes-be-predicted (дата обращения: 03.10.2021).
- 4. Ибрагимов А.Х. Оценка эффективности системы раннего оповещения о сильных землетрясениях в условиях редкой сети сейсмических станций // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2020. Т. 4. № 3. С. 280-286. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.280.
- 5. Кислов К.В., Гравиров В.В. Сейсмическая защита протяженных объектов // Инженерная защита. 2015. № 6 (11). С. 58-65.
- 6. 6. Minson S.E., Baltay A.S., Cochran E.S. The Limits of Earthquake Early Warning Accuracy and Best Alerting Strategy // Scientific Reports. 2018. Vol. 9. Article Number 2478. DOI: 10.1038/s41598-019-39384-y.
- 7. Ravilious K. Italian Earthquake Data Hint at Possibility of Forecasting One Type of Quake // Nature. 2018. Vol. 562. P. 470-471. DOI: 10.1038/d41586-018-07017-5.
- 8. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40. DOI: 10.7868/S0203030613010021.
- Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю.
 Сейсмичность Камчатского региона 1962-2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41-64. DOI: 10.7868/S0203030613010057.
- 10. Каррыев Б.С. Катастрофы в природе: землетрясения. Гипотезы, факты, причины, последствия. Екатеринбург: Издательские решения, 2009. 522 с.
- 11. Сывороткин В.Л. Землетрясения // Пространство и время. 2011. № 2 (4). С. 124-137.



- 12. Дода Л.Н., Мартынов О.В., Пахомов Л.А., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Наземно-космический мониторинг и прогноз мегаземлетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // Наука и технологические разработки. 2011. Т. 90. № 1. С. 35-44.
- 13. Акатьев В.А., Метелкин Е.В., Нигметов Г.М. Методы и средства оценки и снижения сейсмического риска. Обзор // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 5. С. 75-86. DOI: 10.12737/24154.
- 14. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. 258 с.
- 15. Ishiwatari M. Tsunami and Earthquake Warning Systems. Washington: World Bank, 2012. 12 p.
- 16. Аветисян А.М., Бурмин В.Ю., Манукян А.Г. Основные методы повышения точности регистрации и обработки сейсмологической информации // Известия Национальной академии наук Республики Армения. Науки о Земле. 2012. Т. 65. № 3. С. 70-77.
- 17. Bery A.A., Saad R. Correlation of Seismic P-Wave Velocities with Engineering Parameters (N Value and Rock Quality) for Tropical Environmental Study // International Journal of Geoscience. 2012. Vol. 3. No. 4. P. 749-757. DOI: 10.4236/ijg.2012.34075.
- 18. Vikulin A.V., Tveritinova T.Y., Ivanchin A.G. Wave Moment Geodynamics // Acta Geophysica. 2013. Vol. 61. P. 245-263. DOI: 10.2478/s11600-012-0079-8.
- 19. Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2005. № 1 (23). URL: http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/stgusev/gusevao2005scenario%5B1%5D. pdf (дата обращения: 03.10.2021).



- 20. Акатьев В.А., Метелкин Е.В., Волкова Л.В. Оповещение граждан о приближении разрушительной сейсмической волны // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование: сб. науч. тр. Международ. науч.-технич. симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения». М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. Т. 1. С. 227-231.
- 21. Харазова Ю.В., Павленко О.В., Дудинский К.А. Связь характеристик распространения сейсмических волн на Западном Кавказе с геологотектоническими особенностями региона // Физика Земли. 2016. № 3. С. 68-81. DOI: 10.7868/S0002333716030042.
- 22. Назаров Л.А., Назарова Л.А. Метод определения параметров очага готовящегося землетрясения на основе данных о смещениях дневной поверхности // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 4. С. 534-538.

References

- 1. *SP* 14.13330.2018. *Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh* [SP 14.13330.2018. Seismic Building Design Code]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 122 p. [in Russian].
- 2. Ulomov V.I. Obshchee seismicheskoe raionirovanie territorii Rossiiskoi Federatsii OSR-2012 [General Seismic Zoning of the Territory of Russia OSR-2012]. *Voprosy inzhenernoi seismologii Voprosy Inzhenernoi Seismologii*, 2013, Vol. 40, No. 4, pp. 5-20. [in Russian].
- 3. Yanes J. Can Earthquakes be Predicted? *GNS Science*. Available at: https://www.gns.cri.nz/Home/Learning/Science-

Topics/Earthquakes/Monitoring-Earthquakes/Other-earthquake-questions/Canearthquakes-be-predicted (accessed 03.10.2021).



- 4. Ibragimov A.Kh. Otsenka effektivnosti sistemy rannego opoveshcheniya o sil'nykh zemletryaseniyakh v usloviyakh redkoi seti seismicheskikh stantsii [Assessment of the Effectiveness of the Early Warning System for Severe Earthquakes in a Rare Network of Seismic Stations]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi Journal of Civil Protection*, 2020, Vol. 4, No. 3, pp. 280-286. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.280. [in Russian].
- 5. Kislov K.V., Gravirov V.V. Seismicheskaya zashchita protyazhennykh ob"ektov [Seismic Protection of Extended Objects]. *Inzhenernaya zashchita Territory Engineering*, 2015, No. 6 (11), pp. 58-65. [in Russian].
- 6. Minson S.E., Baltay A.S., Cochran E.S. The Limits of Earthquake Early Warning Accuracy and Best Alerting Strategy. *Scientific Reports*, 2018, Vol. 9, Article Number 2478. DOI: 10.1038/s41598-019-39384-y.
- 7. Ravilious K. Italian Earthquake Data Hint at Possibility of Forecasting One Type of Quake. *Nature*, 2018, Vol. 562, pp. 470-471. DOI: 10.1038/d41586-018-07017-5.
- 8. Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A., Levina V.I., Senyukov S.L., Sergeev V.A., Shevchenko Yu.V., Yashchuk V.V. Sistema detal'nykh seismologicheskikh nablyudenii na Kamchatke v 2011 g. [The System of Detailed Seismological Observations in Kamchatka in 2011]. *Vulkanologiya i seismologiya Vulkanologiya i Sejsmologiya*, 2013, No. 1, pp. 18-40. DOI: 10.7868/S0203030613010021. [in Russian].
- 9. Levina V.I., Lander A.V., Mityushkina S.V., Chebrova A.Yu. Seismichnost' Kamchatskogo regiona 1962-2011 gg. [The Seismicity of the Kamchatka Region: 1962-2011]. *Vulkanologiya i seismologiya Vulkanologiya i Sejsmologiya*, 2013, No. 1, pp. 41-64. DOI: 10.7868/S0203030613010057. [in Russian].
- 10. Karryev B.S. *Katastrofy v prirode: zemletryaseniya. Gipotezy, fakty, prichiny, posledstviya* [Natural Disasters: Earthquakes. Hypotheses, Facts, Reasons, Consequences]. Yekaterinburg, Izdatel'skie resheniya Publ., 2009. 522 p. [in Russian].



- 11. Syvorotkin V.L. Zemletryaseniya [Earthquakes]. *Prostranstvo i vremya Space and Time*, 2011, No. 2 (4), pp. 124-137. [in Russian].
- 12. Doda L.N., Martynov O.V., Pakhomov L.A., Natyaganov V.L., Stepanov I.V. Nazemno-kosmicheskii monitoring i prognoz megazemletryaseniya v Yaponii 11 marta 2011 g. [Earth-Space Monitoring and Prediction of the Japan Mega Earthquake of March 11, 2011]. *Nauka i tekhnologicheskie razrabotki Science and Technological Developments*, 2011, Vol. 90, No. 1, pp. 35-44. [in Russian].
- 13. Akatev V.A., Metelkin E.V., Nigmetov G.M. Metody i sredstva otsenki i snizheniya seismicheskogo riska. Obzor [Methods and Tools of Seismic Risk Assessment and Reduction. Overview]. *Bezopasnost' v tekhnosfere Safety in Technosphere*, 2016, Vol. 5, No. 5, pp. 75-86. DOI: 10.12737/24154. [in Russian].
- 14. Yanovskaya T.B. *Osnovy seismologii* [Fundamentals of Seismology]. St. Petersburg, SPbGU Publ., 2008. 258 p. [in Russian].
- 15. Ishiwatari M. *Tsunami and Earthquake Warning Systems*. Washington, World Bank, 2012. 12 p.
- 16. Avetisyan A.M., Burmin V.Yu., Manukyan A.G. Osnovnye metody povysheniya tochnosti registratsii i obrabotki seismologicheskoi informatsii [General Methods of Accuracy Improvement of Registration and Processing of Seismic Information]. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Armeniya. Nauki o Zemle Proceedings of NAS RA. Earth Science*, 2012, Vol. 65, No. 3, pp. 70-77. [in Russian].
- 17. Bery A.A., Saad R. Correlation of Seismic P-Wave Velocities with Engineering Parameters (N Value and Rock Quality) for Tropical Environmental Study. *International Journal of Geoscience*, 2012, Vol. 3, No. 4, pp. 749-757. DOI: 10.4236/ijg.2012.34075.
- 18. Vikulin A.V., Tveritinova T.Y., Ivanchin A.G. Wave Moment Geodynamics. *Acta Geophysica*, 2013, Vol. 61, pp. 245-263. DOI: 10.2478/s11600-012-0079-8.



- 19. Gusev A.A., Shumilina L.S., Akatova K.N. Ob otsenke seismicheskoi opasnosti dlya goroda Petropavlovska-Kamchatskogo na osnove nabora stsenarnykh zemletryasenii [On the Assessment of Seismic Hazard for the City of Petropavlovsk-Kamchatsky Based on a Set of Scenario Earthquakes]. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN Vestnik Otdelenia Nauk o Zemle RAN*, 2005, No. 1 (23). URL: http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/stgusev/gusevao2005scenario%5B1%5D. pdf (accessed 03.10.2021). [in Russian].
- 20. Akatev V.A., Metelkin E.V., Volkova L.V. Opoveshchenie grazhdan o priblizhenii razrushitel'noi seismicheskoi volny [Alerting Citizens about the Approach of a Destructive Seismic Wave]. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma «Vtorve mezhdunarodnye Kosyginskie *«Energoresursoeffektivnye* chteniya» ekologicheski bezopasnye tekhnologii i oborudovanie» [Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Technical Symposium «Second International Kosygin Readings» «Energy Efficient Environmentally Friendly Technologies and Equipment»]. Moscow, RGU im. A.N. Kosygina Publ., 2019, Vol. 1, pp. 227-231. [in Russian].
- 21. Kharazova Yu.V., Pavlenko O.V., Dudinskii K.A. Svyaz' kharakteristik rasprostraneniya seismicheskikh voln na Zapadnom Kavkaze s geologotektonicheskimi osobennostyami regiona [The Correlation between the Characteristics of Seismic Wave Propagation in Western Caucasus and the Geological-Tectonic Features of the Region]. *Fizika Zemli Fizika Zemli*, 2016, No. 3, pp. 68-81. DOI: 10.7868/S0002333716030042. [in Russian].
- 22. Nazarov L.A., Nazarova L.A. Metod opredeleniya parametrov ochaga gotovyashchegosya zemletryaseniya na osnove dannykh o smeshcheniyakh dnevnoi poverkhnosti [Method for Determination of Impending Earthquake Focal Parameters Based on Daylight Surface Displacement Data]. *Doklady Akademii nauk Doklady Akademii Nauk*, 2009, Vol. 427, No. 4, pp. 534-538. [in Russian].



Сведения об авторах

About the authors

Владимир Андреевич Акатьев, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Vladimir A. Akatev, Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: akatiev07@mail.ru

Грязнев Данил Юрьевич, канд. техн. наук, заместитель директора Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Danil Yu. Gryaznev, Candidate of Engineering Sciences, Deputy Director of Scientific and Educational Extreme Situations Research Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: daniel58912007@gmail.com

Акатьев Сергей Владимирович, руководитель направления Департамента по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и пожарной безопасности, АО «Сибирская угольная энергетическая компания», Москва, Россия

Sergey V. Akatev, Head of Department of Civil Defence, Emergencies and Fire Safety, Siberian Coal Energy Company JSC, Moscow, Russia



Зенцов Игорь Иванович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

Igor I. Zentsov, Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher, All-Russian Science Research Institute of Civil Defence and Emergencies of EMERCOM (Federal Center of Science and High Technologies), Moscow, Russia

e-mail: zentsov_i@mail.ru