УДК 550.34.052

Генерация карт сотрясаемости (PGA) на территории РФ с помощью сейсмологического сервиса Eqalert.ru

А.В. Коновалов, А.А. Степнов, Р.Ю. Дмитриенко, И.Д. Орлин, А.С. Сычев, А.Т. Цой, Е.С. Богданов

ООО «Геофизические технологии», г. Южно-Сахалинск, Россия

Автор для переписки: А.В. Коновалов, e-mail: a.konovalov@geophystech.ru

Аннотация. В статье представлены методологические и технологические аспекты по созданию и функционированию первого в России отечественного сейсмологического сервиса, поставляющего оперативную информацию о землетрясениях и сейсмических воздействиях на всей территории страны. Для этого определены зоны, подверженные сейсмическому риску, и для каждой из них подобрано соответствующее уравнение затухания пикового ускорения грунта из опубликованных научных статей с глобальными и региональными моделями. Подбор уравнений осуществлялся исходя из сейсмотектонического принципа дискриминации сейсмогенных участков Земли и воспроизводимости вычислений в условиях острого дефицита геофизической информации. Сейсмологический сервис поддерживает три интерфейса: телеграм-бот (https://t.me/eqalert_ru_bot), веб-сайт (https://eqalert.ru/), мобильные приложения для iOS (https://itunes.apple.com/ru/app/eqalert/id1448087679) и Android (https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.geophystech.eqalert). Программная реализация выполнена на языках PHP, java script, swift и java. Ключевым компонентом сервиса является программный интерфейс для автоматического представления данных о сейсмических событиях и результатах расчёта. Программный интерфейс является связующим звеном сервиса и реализует обмен данными между отдельными компонентами сервиса по технологии RESTfull API. Представленный в настоящей статье сервис позволяет оперативно и точнее существующих аналогов оценивать сейсмические воздействия на городскую инфраструктуру. Точность достигается путем использования регионализированных уравнений затухания, а оперативность – за счет нескольких источников данных о произошедших землетрясениях. Для пользователей сервиса геопространственные характеристики сейсмических воздействий представляются в виде карт сотрясаемости, в то время как автоматизированные системы и службы получают полный набор данных с использованием программного интерфейса.

Ключевые слова: землетрясение, мониторинг, карта сотрясаемости, уравнение затухания, сейсмическое воздействие, пиковое ускорение грунта, автоматизированная служба, Россия

Введение

После возникновения землетрясения крайне важно оперативно оценить уровень сейсмических воздействий на объекты городской инфраструктуры. В основном информация о сейсмических воздействиях на базе координатной сетки (другими словами, карта сотрясаемости или поле сейсмических воздействий) используется для оценки потенциальных повреждений и ущерба путем расчета по параметрическим функциям (например, [Earthquake…, 2022a]). Эти данные востребованы при реализации мер по ликвидации последствий землетрясения.

Пожалуй, единственным источником карт сотрясаемости до недавнего времени являлся сейсмологический сервис Геологической службы США (USGS). Позже такие сервисы стали появляться в других странах (например, [Japan…, 2022]), однако в большинстве случаев в качестве методологической и программно-технологической

основы использовалась платформа ShakeMap, разработанная в USGS [*Michelini et al.*, 2020]. С одной стороны, использование готового программного продукта с открытым исходным кодом существенно упрощает практическую реализацию сервиса, с другой стороны, это привносит определенные ограничения, связанные с региональными спецификами, сейсмическими эффектами и т.п. Этот факт наглядно демонстрирует недавнее разрушительное землетрясение (Mw=5.5), произошедшее в 2018 г. в пределах префектуры Осака (Япония). Согласно карте сотрясаемости, сгенерированной сервисом USGS, расчетное значение интенсивности в эпицентре землетрясения составило около 6 баллов MMI, в то время как карты сотрасаемости Японского метеорологического агентства указывают на 6 (нижний порог) баллов по шкале JMA [*Nagamatsu et al.*, 2018]. Здесь следует уточнить, что 6 баллов в нижнем пороге по шкале JMA соответствуют приблизительно 9 баллам по шкале MMI [*Barosh*, 1969], что согласуется с реалистичной макросейсмической обстановкой, сопровождаемой разрушительными последствиями.

К основным недостаткам платформы ShakeMap версии 3.5 можно отнести сложную программную базу, отсутствие унифицированного программного интерфейса (API) и высокую сложность конфигурации региональных уравнений затухания. В версии ShakeMap 4.0, размещенной на репизотории GitHub [GitHub…, 2022a], некоторые недостатки были частично устранены. Новая версия ShakeMap призвана устранить сложности в интеграции с программным продуктом по оценке сейсмического риска OpenQuake [GitHub…, 2022b], однако программная документация и возможность конфигурации новых уравнений затухания по-прежнему отсутствуют.

Таким образом, регионализация платформы ShakeMap, несмотря на представление многих ее управляющих параметров в унифицированном виде, не всегда решает конкретные задачи по аккуратному прогнозированию сейсмических эффектов в конкретном регионе. В связи с этим возникает потребность в разработке методологии и технологии построения карт сотрясаемости и оценки сейсмического риска с учетом региональной специфики сейсмической сети, особенностей измерения параметров сейсмических воздействий, характера городской застройки и т.д.

В настоящей работе представлена методика оперативного построения карт сотрясаемости на территории РФ, реализованная в рамках открытого сейсмологического сервиса Eqalert.ru. Данный информационный ресурс является отечественным IT-продуктом. Он поставляет информацию о землетрясениях и сейсмических воздействиях через Web-браузер, мобильные приложения и мессенджеры [*Коновалов и др.*, 2022].

Уникальной особенностью сервиса является использование специально подобранных уравнений затухания пикового ускорения грунта для каждого субъекта (или нескольких субъектов) РФ в рамках единого аналитического представления модели затухания. В сервисе реализован алгоритм одновременного использования нескольких источников данных о землетрясениях для обеспечения оперативности расчета.

Методика

Зоны мониторинга

В качестве меры сейсмических воздействий для оперативного построения карт сотрясаемости используется пиковое ускорение грунта. Данный параметр описывается уравнением затухания. Закон затухания определяет характер затухания сейсмических воздействий с расстоянием в зависимости от магнитуды сейсмического события.

Территория РФ и сопредельные районы были поделены на отдельные зоны, представленные в виде прямоугольников (рис. 1). Деление на зоны производилось таким образом, чтобы с одной стороны их количество было не таким большим (первые десятки), а с другой стороны – с каждой зоной можно было проассоциировать соответствующее уравнение затухания.

Подбор уравнений затухания для каждой зоны мониторинга

Для параметризации вышеперечисленных зон уравнениями затухания сейсмических воздействий, выраженных в физических единицах, использовался сейсмотектонический принцип дискриминации сейсмогенных участков Земли. Согласно глобальной модели [*Schulte, Mooney,* 2005] на территории РФ и сопредельных государств преобладает смешанный сейсмотектонический режим по классификации, предложенной в [*García et al.,* 2012]: отдельные части исследуемой территории относятся к региону с активной тектоникой, некоторые участки попадают в зону со стабильной континентальной корой, а часть Дальнего Востока РФ (преимущественно Курильские острова Сахалинской области) – в зону субдукции, для которой характерно наличие межплитовых и внутриплитовых типов землетрясений. Поэтому анализ тектонического режима исследуемой территории является крайне важным практическим аспектом, который позволяет обоснованно импортировать модели затухания сильных движений грунта из других регионов Земли с хорошей сейсмологической изученностью и использовать их для оперативной генерации карт сотрясаемости.

В научном сообществе регулярно поднимается вопрос о выборе метрики расстояния в моделях затухания сейсмических воздействий (например, [ShakeMap…, 2022]). В количественных оценках сейсмической опасности чаще всего используются пространственные метрики Rrup и Rjb в качестве характеристического расстояния между протяженным разрывом и рассматриваемом участком. Поэтому разработчики таких моделей часто останавливаются именно на вышеуказанных характеристиках расстояния. Однако в задаче раннего оповещения о землетрясении, в частности при построении карт сотрясаемости, используется гипоцентральное (или эпицентральное) расстояние, так как характеристики протяженного источника становятся доступными на сайтах сейсмологических дата-центров спустя длительное время (от нескольких часов до нескольких суток) после возникновения сильного землетрясения. Поэтому для оперативного расчета поля сейсмических воздействий крайне важно использовать гипоцентральное расстояние (Rhyp) в соответствующих моделях затухания.

Анализ доступных эмпирических соотношений затухания [*Douglas*, 2016] показывает, что для регионов с активной коровой сейсмичностью не существует моделей, использующих метрику Rhyp. По всей видимости, единственным исключением из сложившейся практики является модель ASB2013 [*Akkar et al.,* 2014], разработанная авторами специально для стран Европы, которую можно отнести к региону со стабильной корой. В этой модели на ряду с пространственной метрикой Rjb используется Rhyp. Данное эмпирическое соотношение используется в настоящей работе для параметризации сейсмических воздействий в западной и центральной частях РФ, граничащих с Восточно-Европейской платформой, которая в тектоническом плане является одним из крупнейших и устойчивых участков земной коры (рис. 1).

Модели затухания, разработанные по записям землетрясений в восточной части США, также зачастую используются в оценках сейсмической опасности для регионов со стабильной корой (например, [Pacific…, 2015]). Одна из таких моделей (AB1995) использовалась раннее в оценках сейсмической опасности в Канаде (например, [*Atkinson*, 1995; *Adams et al.,* 1995]). Здесь также используется подходящая для нашей задачи метрика расстояния Rhyp. Данная модель и ее аналог ASB2013 воспроизводятся (в равных пропорциях) для построения гибридной модели и последующей параметризации сейсмических воздействий в Дальневосточных регионах РФ с устойчивой корой (рис. 1). Такая гибридная модель обозначается как AB1995+ASB2013 (рис. 1).

Для Кавказа (рис. 1), по всей видимости, подойдет модель, разработанная для Грузии по эмпирическим данным. Об этом отмечают сами авторы недавно разработанной модели JSGGA2022 [*Jorjiashvili et al.,* 2022]. В этой модели также используется пространственная метрика Rhyp.

Для параметризации сейсмических воздействий для регионов с активной корой используется модель AS1997 [*Abrahamson, Silva,* 1997]. Несмотря на то, что в модели AS1997 применяется метрика Rrup (наикратчайшее расстояние до плоскости разрыва), мы использовали данное эмпирическое соотношение затухания для параметризации сейсмических воздействий в регионах РФ и сопредельных странах с активной корой (рис. 1). Результаты недавних исследований (например, [*Thompson, Worden,* 2017]) позволяют конвертировать метрики расстояния из одной в другую, однако для этого необходимо знать положение гипоцентра на плоскости разрыва и механизм очага (или хотя бы диапазон углов нодальной плоскости). Однако такие данные на текущий момент в ряде регионов не известны и могут быть учтены в будущем при их появлении. Поэтому мы использовали упрощенный подход, в рамках которого параметризация метрики расстояния происходила путем замены Rrup на Rhyp. Более поздние модификации данной модели (например, [*Abrahamson, Silva,* 2008; *Abrahamson et al.*, 2014]) содержат уточненные коэффициенты и довольно внушительный набор исходных параметров, относящихся к очагу землетрясения и геологической среде, в которой распространяются сейсмические волны. Большинство таких параметров (например, глубина до отметки земной коры со скоростью 1100 м/с и др.) не известно в ряде регионов. Возникающая неопределенность входных параметров существенно затрудняет параметризацию сейсмических воздействий. Поэтому мы остановились на выборе более ранней и упрощенной модели 1997 г. [*Abrahamson, Silva,* 1997].

По данным статьи [*Wong et al.*, 2002], в которой анализировались инструментальные измерения, для северного Китая подходят модели затухания, разработанные для западной части США. Модель AS1997 и ее более поздние модификации как раз относятся к таким моделям. Поэтому в районах, граничащих с северной частью Китая, в которых преобладают активные тектонические процессы, применяется модель AS1997. В частности, к такой территории относится юго-восточная часть Казахстана (рис. 1).

Еще одна модель (используемая в настоящей работе), в которой также применяется метрика Rrup, – это эмпирическое соотношение затухания пикового ускорения грунта для зоны субдукции, построенное по записям японских землетрясений [*Morikawa, Fujiwara,* 2013]. Данные уравнения описываются разными коэффициентами для коровых (модель MF2013_1), межплитовых (модель MF2013_2) и внутриплитовых (модель MF2013_3) землетрясений. Мы используем их преимущественно для параметризации сейсмических воздействий в районе Японо-Курило-Камчатской дуги (рис. 1). Для данной территории замена Rrup на Rhyp не так критична в силу удаленности очагов землетрясений от населенных пунктов. Однако для мега-землетрясений с $M \geq 8$, когда линейный размер очага составляет порядка нескольких сотен километров, такая параметризация будет вносить в ряде случаев систематические смещения в оценках прогнозного уровня движения грунта. Данный факт может компенсировать метод средневзвешенного анализа поля сейсмических воздействий, который учитывает реальные измерения в населенных пунктах.

Для о. Сахалин и его шельфа раннее была разработана региональная модель затухания (Sakh2018) с метрикой Rhyp по записям местных землетрясений [*Коновалов и др.*, 2018]. Данная модель не учитывает сильные землетрясения, поэтому в настоящей работе для корректной параметризации сейсмических воздействий в широком диапазоне магнитуд используется гибридная модель Sakh2018+AS1997 (рис. 1), в которой учитывались (в равных пропорциях) уравнения затухания региональной модели Sakh2018 и глобальной модели AS1997 для диапазона магнитуд M от 4 до 6. При построении гибридной модели Sakh2018+AS1997 для $M>6$ использовалась только модель AS1997. Выбор модели AS1997 обусловлен тем, что она достаточно хорошо согласуется с измеренными значениями PGA сахалинских землетрясений [*Konovalov et al.*, 2018].

Для смешанных зон (рис. 1), в которых присутствуют одновременно участки с активной тектоникой и устойчивой корой, использовалась гибридная модель

AB1995+AS1997 (в равных пропорциях). Исключение составляют зоны, которые охватывают Иркутскую область и Приамурье. В этих сейсмогенных районах изосейстовые области от местных землетрясений характеризуются относительно большими радиусами (например, [*Khanchuk et al.*, 2012]), в то же время сотрясаемость в эпицентральной зоне систематически меньше расчётной интенсивности. Для того, чтобы учесть данные особенности мы используем современную модель затухания для устойчивой коры ASB2013* (рис. 1), в которой коэффициент перед Rhyp принудительно занулен. Физически это означает, что добротность среды принимает бесконечно большие значения и вклад в затухание дает в основном геометрическое расхождение фронта сейсмической волны, что в общих чертах подтверждается недавними исследованиями [*Предеин*, 2022].

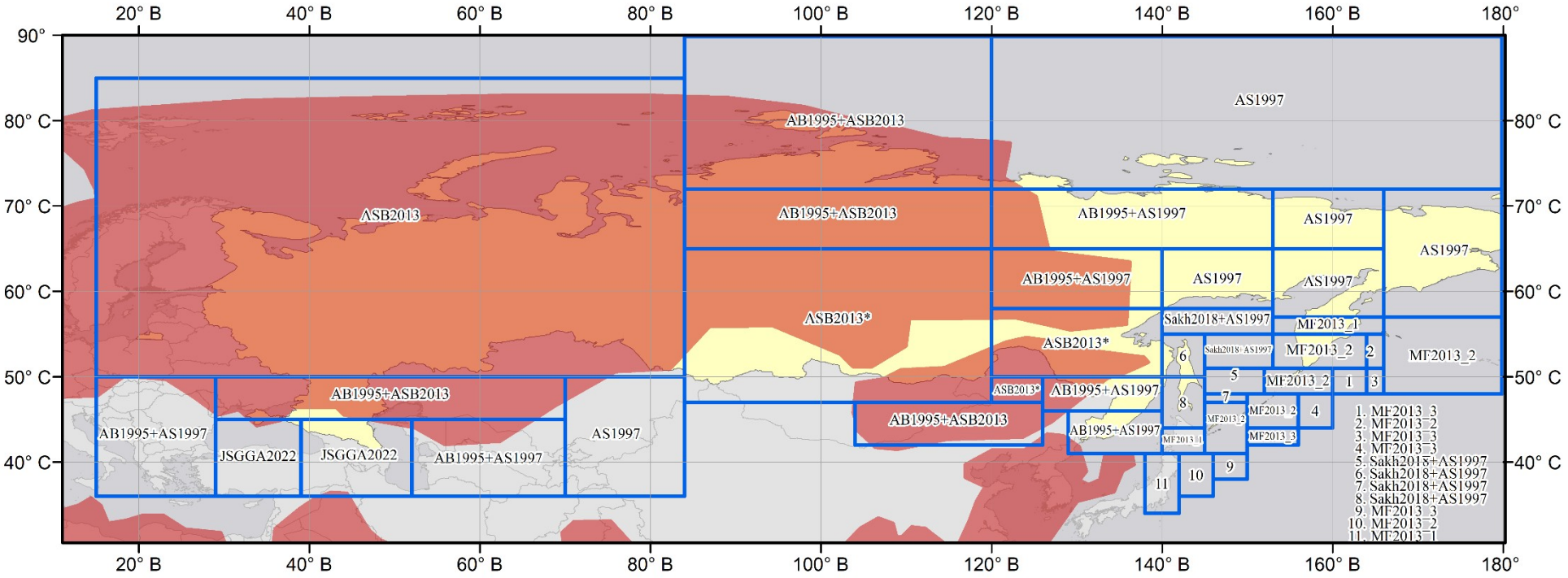

Рис. 1. Расположение зон на территории РФ и сопредельных стран, подверженных сейсмическому риску, с отметкой соответствующей конфигурации уравнения затухания пикового ускорения грунта

Расшифровка аббревиатур моделей затухания приведена в тексте. Красным цветом показаны области со стабильной корой согласно [*Schulte, Mooney*, 2005]. Желтым цветом отмечены территориальные границы РФ по состоянию на 01.01.2022 г.

Унифицированное представление модели затухания

Моделирование поля сейсмических воздействий выполняется на основе расчета количественной характеристики движения грунта в каждой точке пространства по региональному закону затухания сейсмических воздействий и с учетом геопространственных данных. Закон затухания определяет характер затухания сейсмических воздействий с расстоянием в зависимости от магнитуды сейсмического события. Уровень сейсмических воздействий зависит также от грунтовых условий в пункте наблюдения, слоистости среды и других количественных параметров геофизической среды и очага землетрясения.

Хотя набор физических параметров, с помощью которых описываются современные модели затухания, может доходить до нескольких десятков [*Campbell, Bozorgnia,* 2006; *Douglas,* 2016; *Эртелева,* 2019], мы ограничимся основными характеристиками – это координаты гипоцентра землетрясения, его магнитуда и величина скорости поперечных сейсмических волн в верхней 30-метровой части сейсмического разреза. Последняя определяет локальные характеристики затухания в пункте приема сигнала. Общий вид модели затухания, используемой везде далее, задается следующим образом:

$$lg\,PGA = a*M - lg\left(R_{hyp} + d*10^{e*M}\right) - b*R_{hyp} + c + f_{site}\left(V_{S30}\right) \pm \sigma, \qquad (1)$$

где PGA – пиковое ускорение грунта, M – магнитуда землетрясения, R_{hyp} – гипоцентральное расстояние от очага землетрясения до рассматриваемого пункта, a, b, c, d, e и σ – неизвестные коэффициенты, f_{site} – поправка, учитывающая грунтовые условия (сейсмические характеристики грунтов) в рассматриваемом пункте, V_{S30} – средняя скорость S-волн в 30-метровом грунтовом слое.

Поправка f_{site} задается выражением:

$$f_{site} = p*lg\left[min\frac{\left(V_{Smax}, V_{S30}\right)}{V_0}\right], \qquad (2)$$

где p – константа, V_0 – референтная скорость S-волн в 30-ти метровом грунтовом слое.

Формула (2) не учитывает нелинейные эффекты, возникающие в результате разрушения и потери связности грунтов при прохождении волн с большими амплитудами (обзор нелинейных эффектов приведен, например, в [*Павленко,* 2009]). Несмотря на это зависимость типа (2) была получена на основе данных о землетрясениях, зарегистрированных плотной сетью станций в Японии [*Morikawa, Fujiwara,* 2013]. Вариативность грунтов в Японии по своим сейсмическим характеристикам невысокая. Референтное значение скорости составляет 350 м/с, что соответствует наблюдаемым сейсмическим характеристикам грунтов на Сахалине [*Коновалов и др.,* 2018]. Поэтому прямое импортирование формулы (2) для оценки сайт-эффекта в пределах о. Сахалин и Курило-Охотского сейсмического региона можно считать допустимым. Для других регионов требуется уточнение и корректировка параметров модели (2). Однако в качестве начального приближения мы будем использовать данное выражение.

Значения скорости в верхнем 30-метровом грунтовом слое получены по глобальным картам, доступным в ГИС-основе [*Allen, Wald,* 2007].

Регионализация коэффициентов модели затухания

Как уже было отмечено раннее в выбранных моделях важно использовать гипоцентральное расстояние Rhyp в качестве независимой переменной. Значение коэффициента e согласно [*Morikawa, Fujiwara,* 2013] фиксировалось для всех моделей и составило 0.5. Всего было выбрано шесть исходных моделей, которые далее приводились к представлению (1): AB1995 [*Atkinson, Boore,* 1995], AS1997 [*Abrahamson, Silva,* 1997], ASB2013 [*Akkar et al.*, 2014], MF2013 [*Morikawa, Fujiwara,* 2013], Sakh2018 [*Коновалов и др.,* 2018] и JSGGA2022 [*Jorjiashvili et al.,* 2022]. Модель MF2013 представляет три уравнения затухания с уже известными коэффициентами для коровой, межплитовой и

внутриплитовой сейсмичности, именуемые далее как MF2013_1, MF2013_2 и MF2013_3 соответственно.

Создание стохастического банка данных сильных движений грунта происходило путем симуляции значений пикового ускорения грунта по исходным моделям с учетом случайной составляющей:

$$lg\,PGA_{ij} = F_1(M_i) + F_2(R_j) + \ldots + \sigma_0 * \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

где ij – номер симуляции, PGA_{ij} – пиковое ускорение грунта, M_i – магнитуда, R_j – гипоцентральное расстояние, $F_{1,2,\ldots}$ – используемые в исходных моделях функции, ε_{ij} – некоторая случайная составляющая согласно стандартному нормальному распределению с нулевым средним и единичной дисперсией, σ_0 – стандартное отклонение исходной модели.

Расчет стохастических характеристик для каждой исходной модели производился в диапазонах магнитуд от 4 до 7 и гипоцентральных расстояний от 5 до 200 км. При стохастической симуляции значений пикового ускорения грунта использовались поправочные коэффициенты исходных моделей, нормирующие сейсмические воздействия к средним грунтовым условиям или средней скорости S-волны в верхней части сейсмического разреза V_{S30}=350 м/с. Симуляция производилась для произвольного (или неизвестного) механизма очага землетрясения, что контролировалось соответствующими коэффициентами в исходных моделях затухания.

После создания банка данных с вычисленными значениями PGA для широкого диапазона магнитуд и расстояний, учитывающего случайные неопределенности, вычислялись коэффициенты уравнения (1) с помощью метода нелинейных наименьших квадратов.

Для каждой модели оценивается среднеквадратичное отклонение σ и коэффициент детерминации R^2. Параметр σ принят в качестве метрики статистического рассеяния. Второй параметр R^2 является оценкой качества соответствия предсказанных и реальных данных, т.е. мерой соответствия модели, и выражается в относительных единицах.

На рис. 2 показан пример построения кривых на основе данных, созданных по модели ASB2013. Здесь представлены исходные данные, сгенерированные для фиксированной магнитуды M=5 и диапазона расстояний от 5 до 200 км. Кривая на основе уравнения (1) с вычисленными коэффициентами методом нелинейных наименьших квадратов показана красным цветом; кривая на основе уравнения (1) с фиксированными коэффициентами $d = 0.006875$ и $e = 0.5$ – зелёным цветом; кривая на основе исходного уравнения – оранжевым цветом. В целом исходная модель и модель, восстановленная согласно (1), характеризуются хорошим соответствием во всем диапазоне расстояний. Различия проявляются на расстояниях больше 200 км, однако в этом диапазоне расстояний мы не использовали стохастические данные в силу отклонения коэффициента геометрического расхождения фронта сейсмической волны от $1/R$.

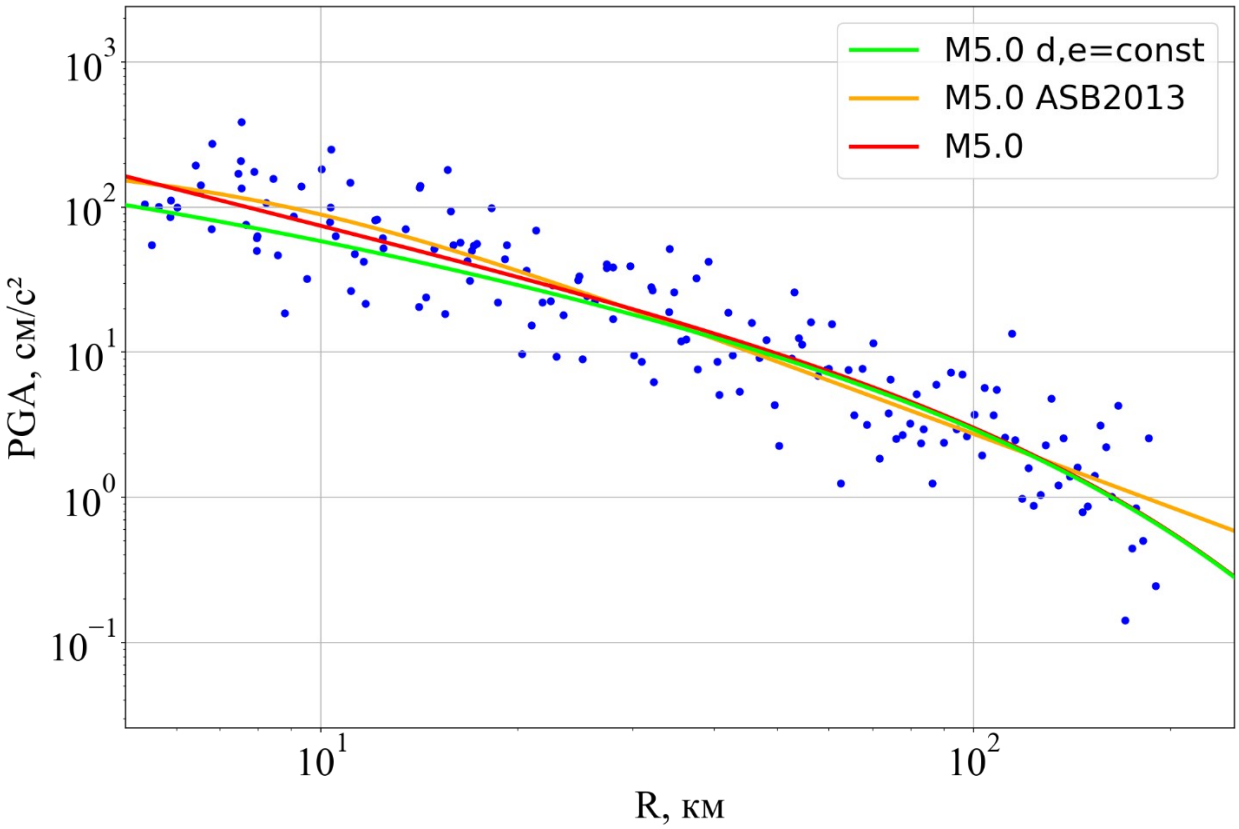

Рис. 2. Поиск наилучшего соответствия кривой на основе сгенерированных значений пикового ускорения грунта (PGA), зависящих от расстояния, по исходной модели ASB2013 для землетрясений с фиксированной магнитудой M=5

В итоге на базе каждой исходной модели были сгенерированы значения PGA со случайными компонентами, которые далее использовались для поиска коэффициентов уравнения (1). На рис. 3-6 представлена графическая иллюстрация стохастических данных, сгенерированных согласно исходным моделям, и наилучших кривых для заданных диапазонов расстояний и магнитуд. Сводка найденных коэффициентов для каждой модели затухания представлена в таблице 1.

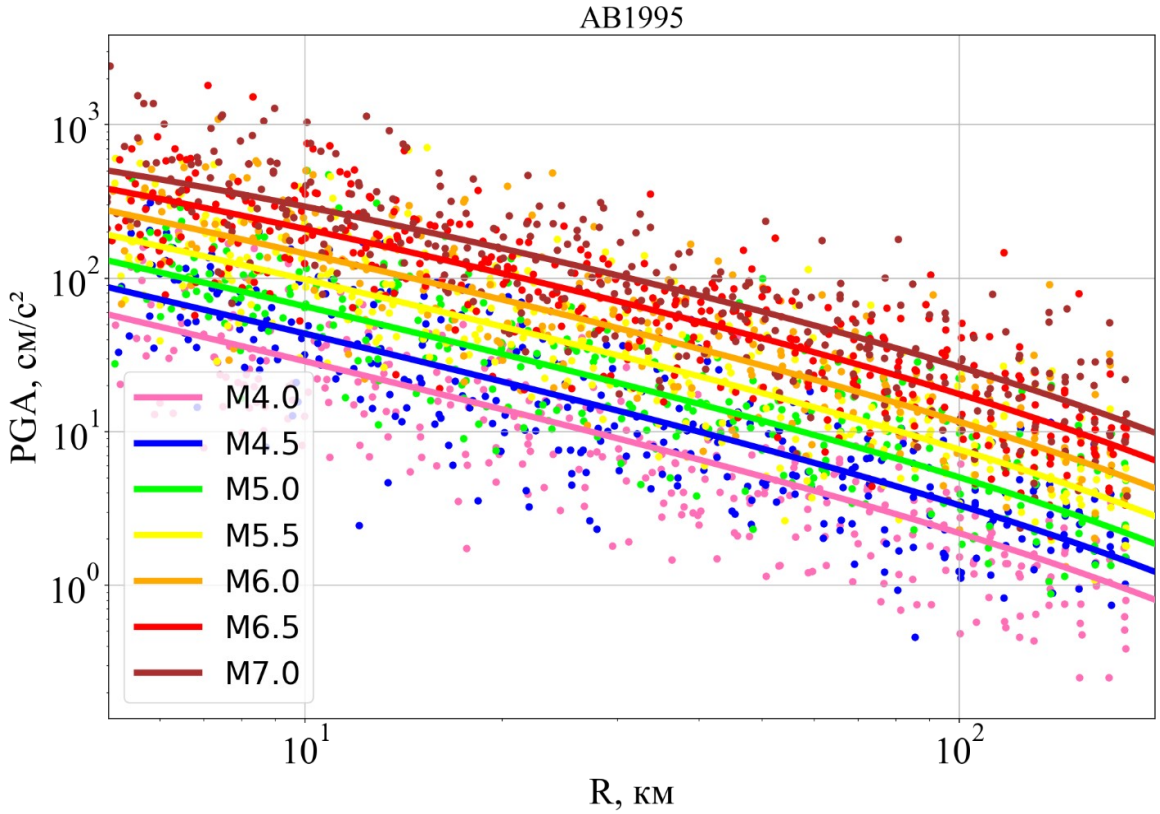

Рис. 3. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно модели AB1995, и наилучшие кривые

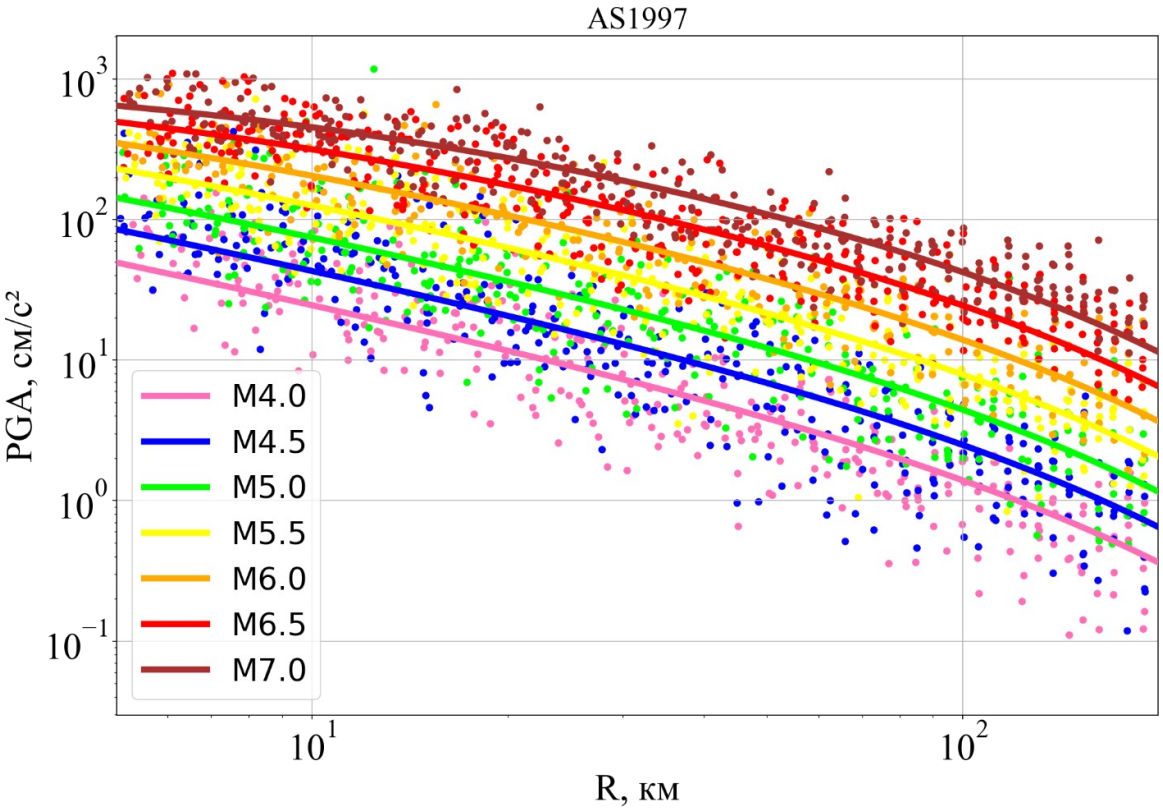

Рис. 4. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно модели AS1997, и наилучшие кривые

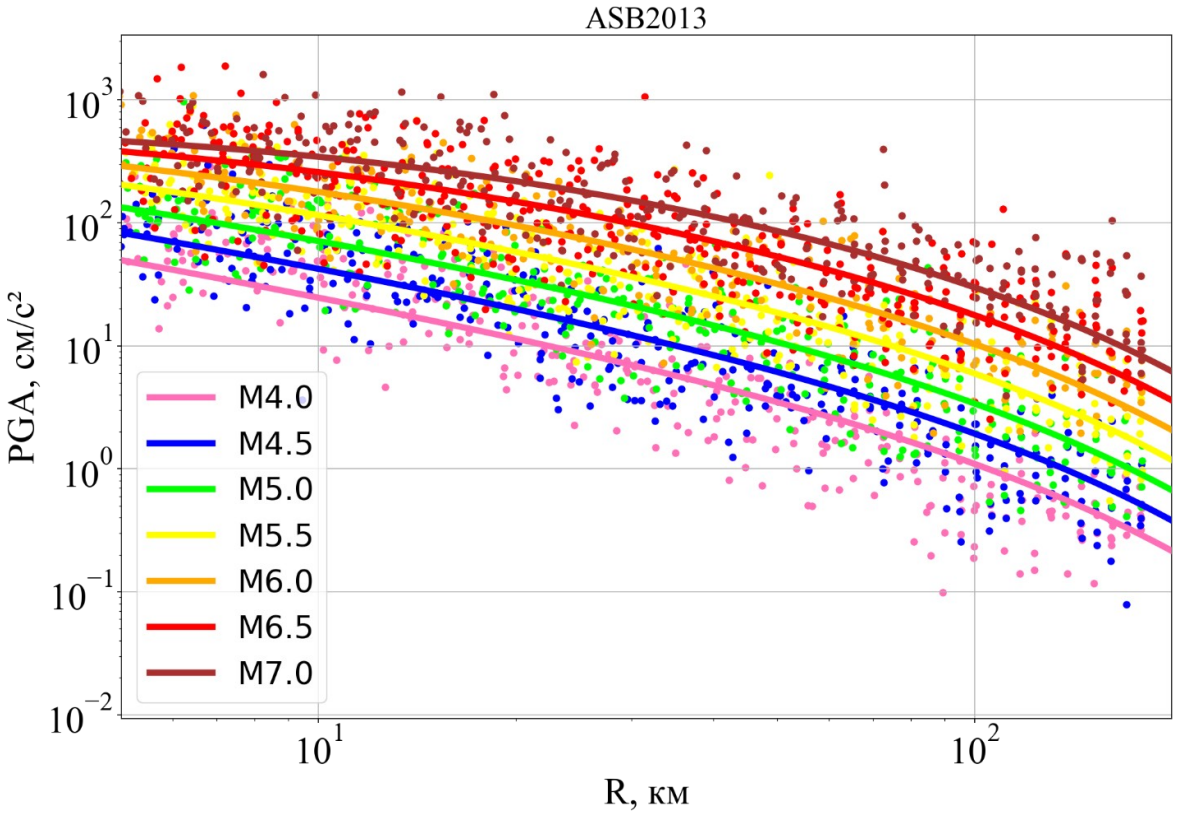

Рис. 5. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно модели ASB2013, и наилучшие кривые

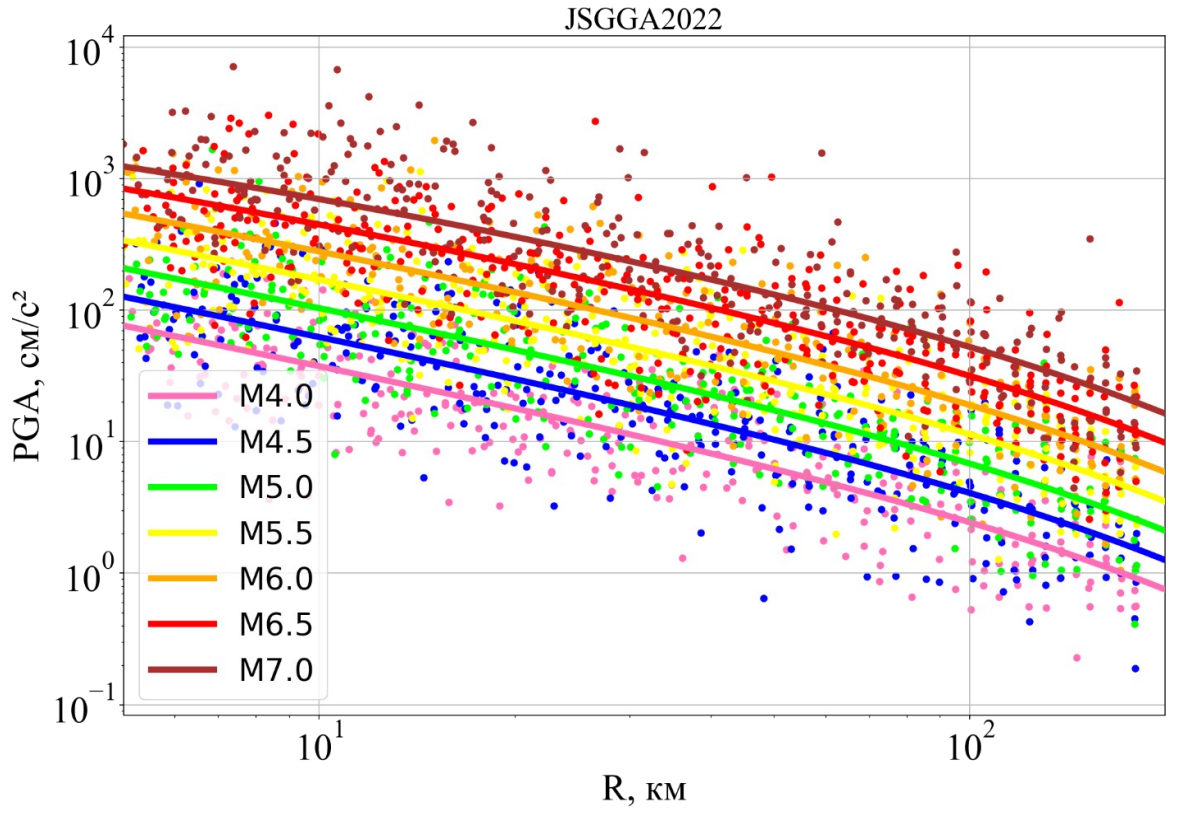

Рис. 6. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно модели JSGGA2022, и наилучшие кривые

Таблица 1. Значения коэффициентов уравнения затухания пикового ускорения грунта согласно аналитического представления (1)

Название модели	*a*	*b*	*c*	*d*	R^2	σ
AB1995	0.344±0.007	0.0014±0.0001	1.141±0.038	0.0005±0.0002	0.801	0.308
AS1997	0.505±0.007	0.0029±0.0001	0.41±0.035	0.0026±0.0004	0.882	0.272
ASB2013	0.495±0.009	0.0041±0.0002	0.468±0.043	0.004±0.0006	0.846	0.321
ASB2013*	0.495	0	0.468	0.004	-	0.321
JSGGA2022	0.447±0.009	0.0021±0.0002	0.81±0.043	0.0006±0.0003	0.797	0.355
MF2013_1 (crustal)	0.5507	0.004531	0.4631	0.006875	-	0.378
MF2013_2 (interface)	0.5507	0.004716	0.5418	0.006875	-	0.378
MF2013_3 (intra-slab)	0.5507	0.005273	0.9338	0.006875	-	0.378
AB1995+AS1997	0.43±0.008	0.0025±0.0001	0.778±0.039	0.0016±0.0003	0.836	0.307
AB1995+ASB2013	0.432±0.009	0.0028±0.0002	0.735±0.042	0.0021±0.0004	0.818	0.327
Sakh2018+AS1997	0.552±0.008	0.0027±0.0002	0.115±0.039	0.0027±0.0004	0.868	0.301

На рис. 3-6 прослеживается зависимость интенсивности сильных движений грунта от расстояния и магнитуды, а также виден разброс данных, обусловленный случайной ошибкой.

На рис. 7 показана сводка всех моделей для тестового землетрясения с магнитудой M=6. В целом можно отметить различие сейсмических ускорений между рассматриваемыми моделями в 2-3 раза, что соответствует разбросу сейсмической интенсивности около одного балла (или даже чуть более). Также отметим существенное отличие кривой затухания для внутриплитовых землетрясений (модель MF2013_3) относительно остальных моделей. Это очередной раз свидетельствует о важности корректного подбора модели затухания для параметризации сейсмических воздействий в каждой сейсмической зоне РФ.

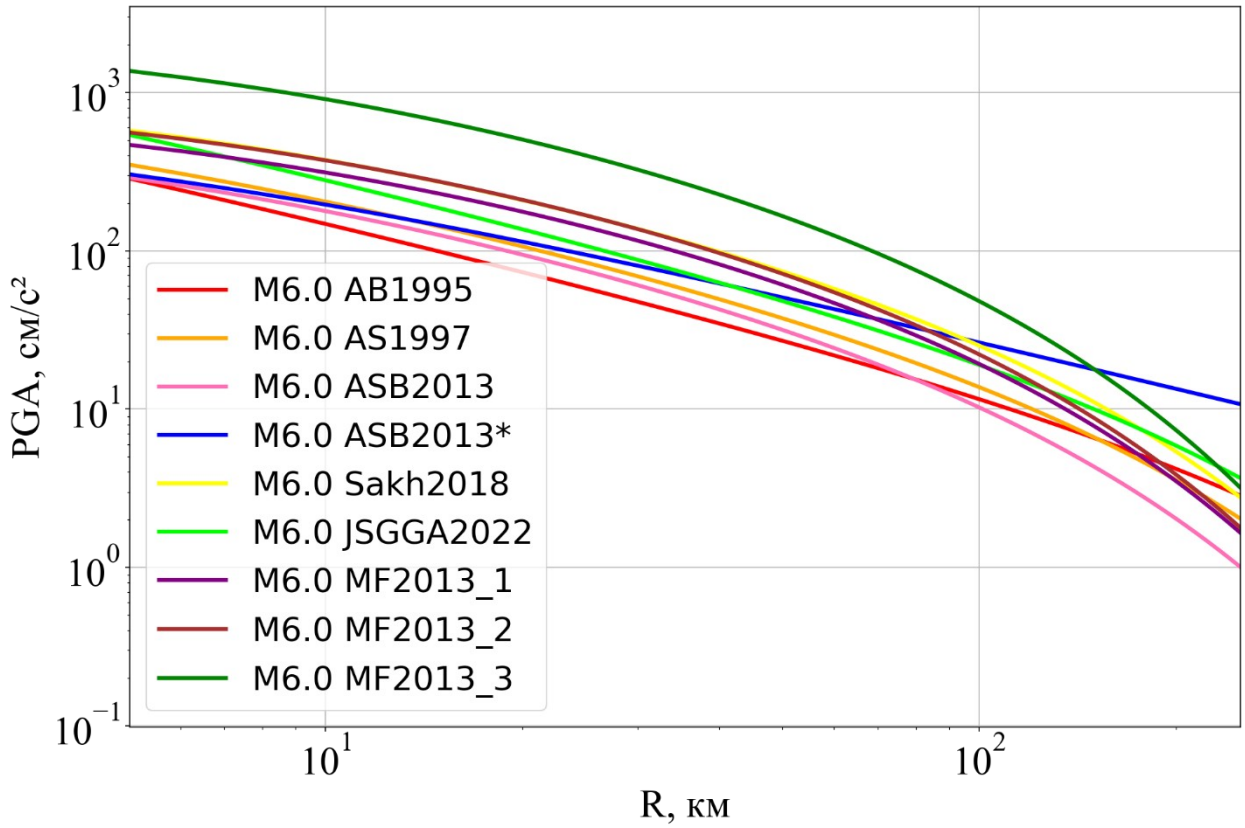

Рис. 7. Кривые затухания пикового ускорения грунта для землетрясения с фиксированной магнитудой M=6 в диапазоне расстояний от 5 до 200 км, построенные согласно найденным коэффициентам (таблица 1)

Далее вычислялись коэффициенты для гибридных моделей, рассмотренных в предыдущем разделе. Стохастические данные модели AB1995 генерировались одновременно с данными моделей AS1997 и с ASB2013, и на их основе определялись коэффициенты гибридных моделей AB1995+AS1997 (рис. 8) и AB1995+ASB2013 (рис. 9) соответственно. По такому же принципу была получена гибридная модель Sakh2018+AS1997 (рис. 10). Таким образом, мы частично компенсируем эпистемическую неопределенность, связанную с дефицитом или отсутствием исходных данных в целевых регионах. Это позволяет получить несмещенные оценки средних параметров движения грунта. Однако тем самым увеличивается рассеяние данных, обусловленное случайной компонентой. В таблице 1 приведены найденные коэффициенты гибридных моделей. В таблицу были также помещены метрики производительности, которые позволяют оценить эффективность статистической подгонки.

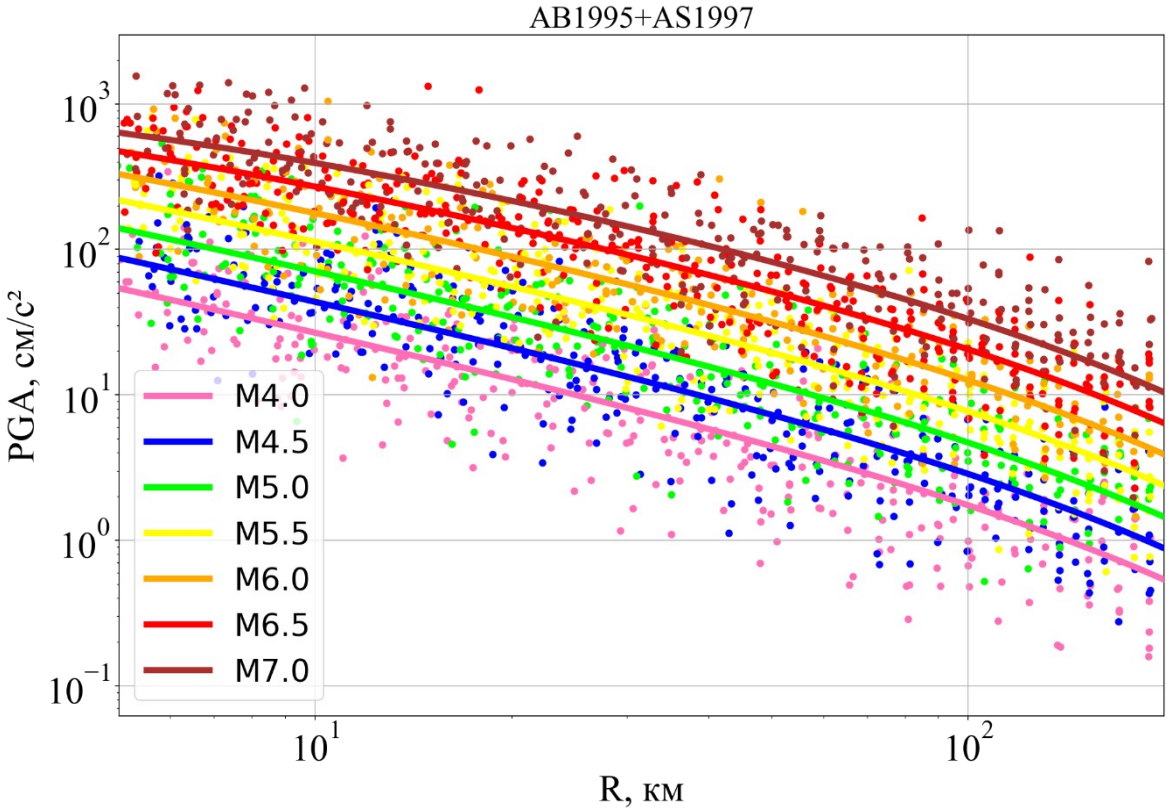

Рис. 8. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно моделям AB1995 и AS1997, и наилучшие кривые

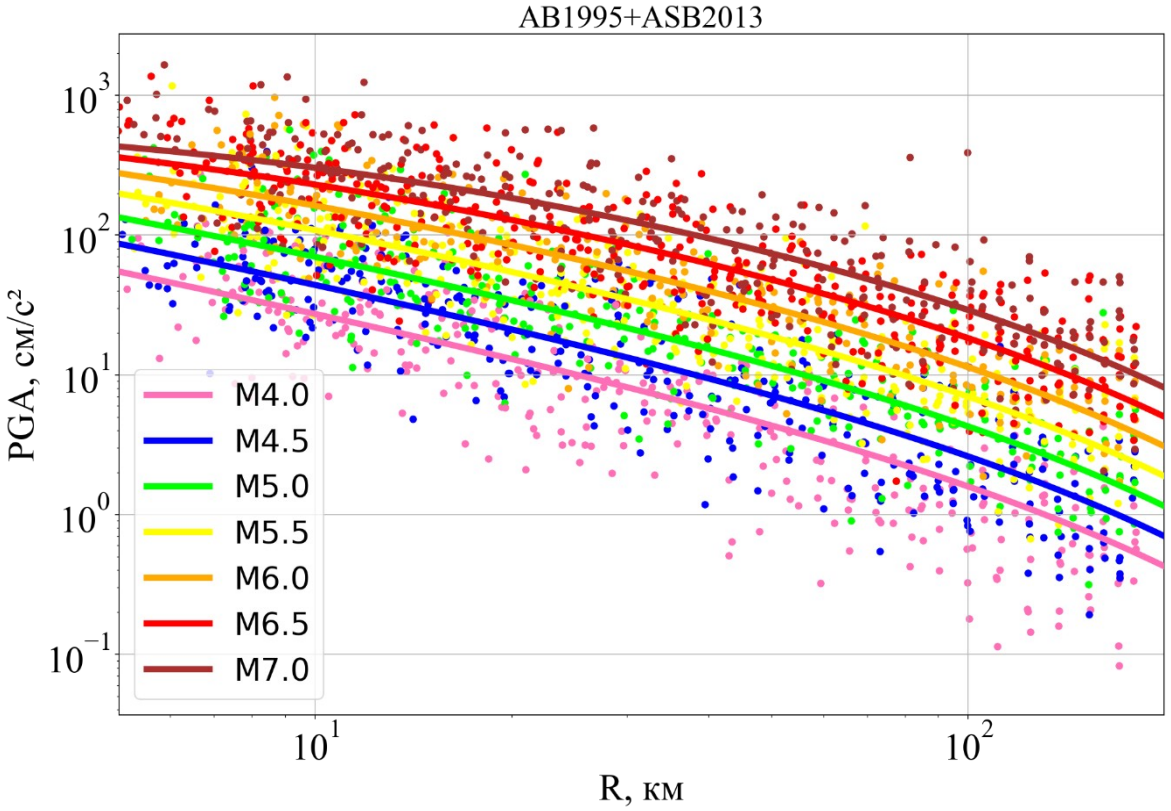

Рис. 9. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно моделям AB1995 и ASB2013, и наилучшие кривые

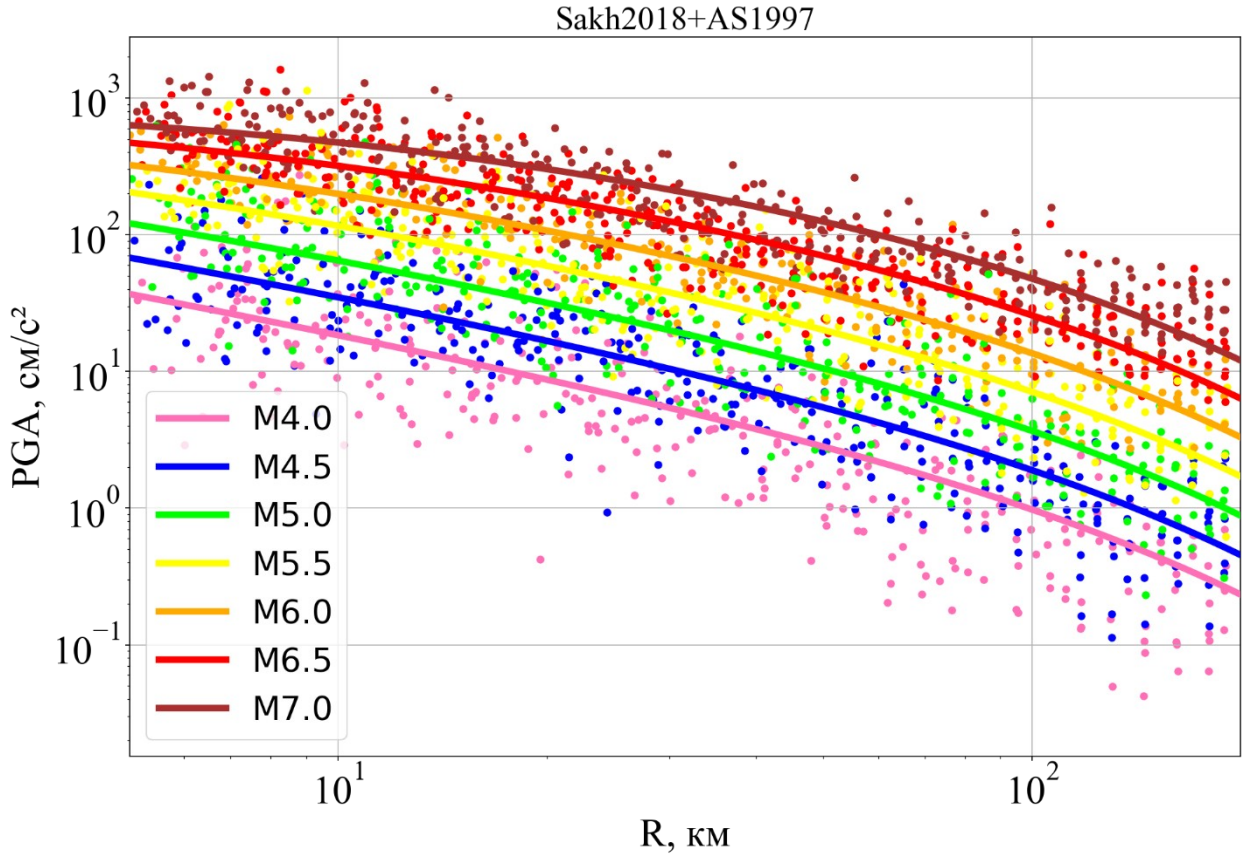

Рис. 10. Значения пикового ускорения грунта (PGA), сгенерированные согласно моделям Sakh2018 и AS1997, и наилучшие кривые

После определения коэффициентов для каждой модели и их гибридных модификаций за каждой сейсмической зоной (рис. 1) был закреплен определенный набор коэффициентов, приведенный в таблице 1.

Средневзвешенный анализ

Систематическая недооценка реального уровня сейсмических колебаний может приводить к искаженной картине ситуационной обстановки и недооценке реальных последствий. Это в свою очередь влияет на безопасность людей, которые оказались в зоне интенсивных сейсмических воздействий, способных вызвать повреждения объектов городской инфраструктуры.

Уникальная методика моделирования поля средневзвешенных параметров сейсмических воздействий, разработанная и реализованная в рамках сервиса, производит корректировку модельных значений сейсмических ускорений в относительно большом радиусе от места измерения ускорения или макросейсмической интенсивности. Разработка, программная реализация и экспериментальное тестирование методики выполнены в рамках гранта Фонда содействия инновациям. Разработанная программа является интеллектуальной собственностью компании [Свидетельство…, 2022], в которой работают авторы настоящей статьи.

Примеры карт сотрясаемости до и после применения средневзвешенного анализа приведены на рис. 11 и рис. 12, соответственно. Сравнение карт показывает, что средневзвешенное поле сейсмических воздействий воспроизводит более реалистичную макросейсмическую картину в эпицентральной зоне землетрясения. Таким образом, при наступлении сейсмического события в экспресс-режиме генерируется карта сотрясаемости в физически измеряемых единицах. Это является важным этапом, предваряющим оценку риска повреждения объектов городской инфраструктуры.

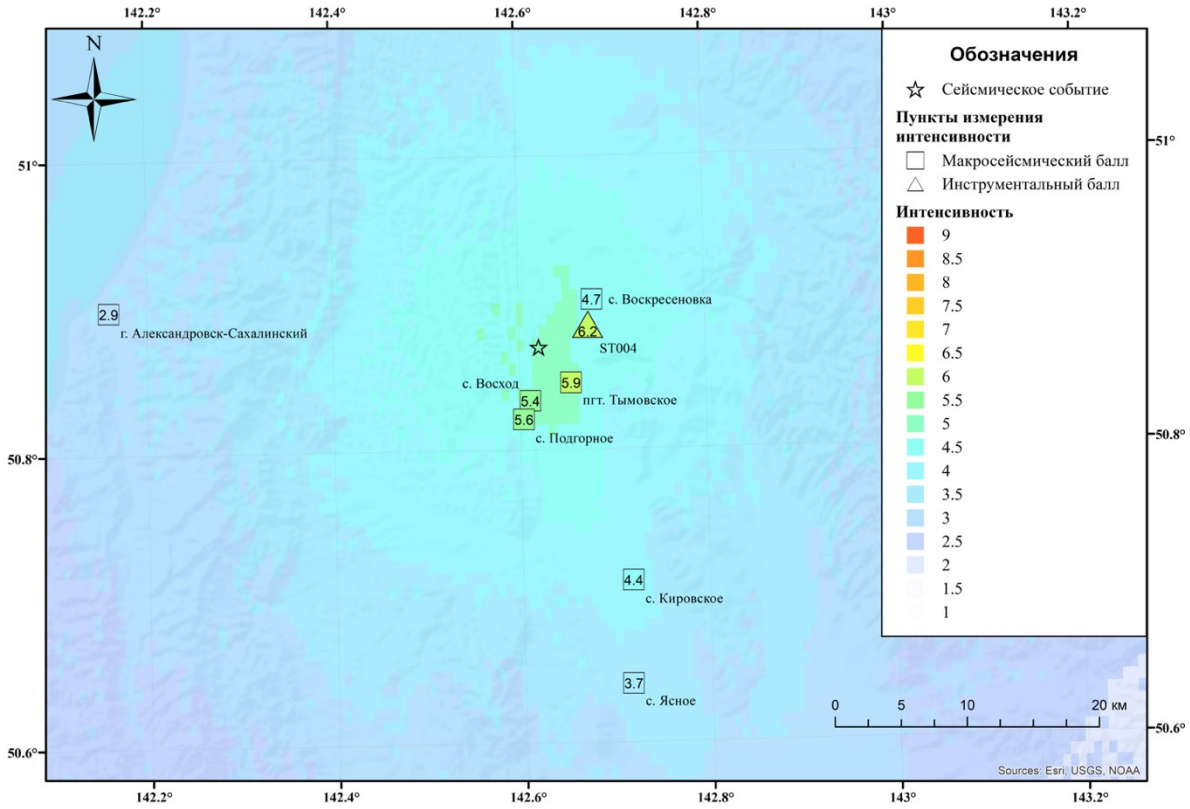

Рис. 11. Карта смоделированного поля сейсмических ускорений, приведенных к интенсивности, с шагом 0.5 км для Тымовского землетрясения (ML=4.5), произошедшего 18 апреля 2021 г. на севере о. Сахалин.

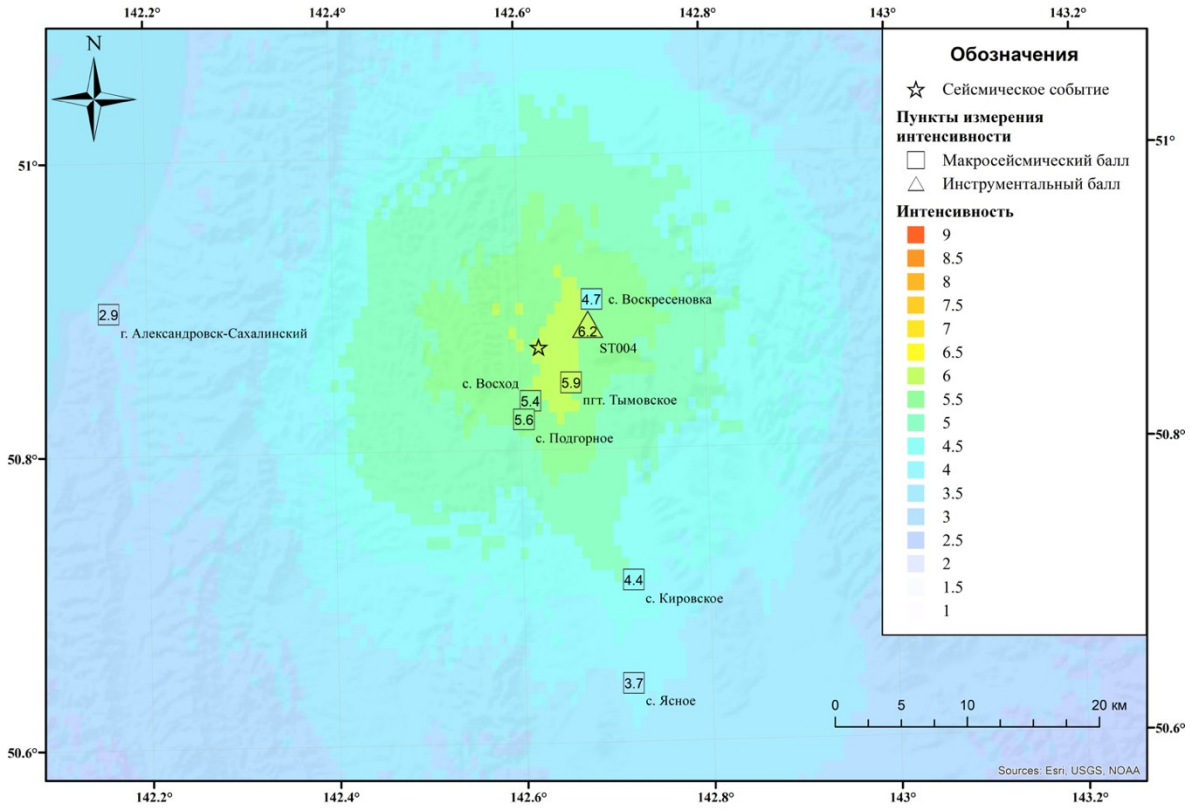

Рис. 12. Карта средневзвешенного поля сейсмических ускорений, приведенных к интенсивности, с шагом 0.5 км для Тымовского землетрясения (ML=4.5), произошедшего 18 апреля 2021 г. на севере о. Сахалин.

Экспресс-верификация

Для экспресс-верификации моделей затухания использовались инструментальные и макросейсмические данные, полученные в ходе мониторинга сильных движений грунта и сбора откликов от населения через Интернет за последние два года. В частности, для верификации модели затухания, описывающей сейсмические ускорения в районе Японо-Курило-Камчатской островной дуги, использовалось тестовое землетрясение с моментной магнитудой Mw=5.9 [Earthquake…, 2022b] и глубиной очага 34.8 км [Eqalert…, 2022a], произошедшее в районе южных Курильских островов 7 августа 2022 г. в 13:40 UTC. Обработанные отклики от населения и значения пикового ускорения грунта, измеренные на станциях, сравнивались с кривой затухания модели MF2013_2 (межплитовый тип землетрясений) для заданной магнитуды (рис. 13). Для удобства интерпретации разнородных данных, характеризующих уровень сейсмических воздействий, пиковое ускорение грунта приводилось к сейсмической интенсивности по формуле, апробированной ранее [*Коновалов и др.*, 2022]:

$$I = 2.5 * lg\, PGA + 1.89, \quad (4)$$

где I – макросейсмическая интенсивность по шкале ШСИ-2017, PGA – пиковое ускорение грунта, измеряемое в см/сек^2.

В целом, можно отметить ожидаемое соответствие измеренных и расчетных данных (рис. 13). Наблюдаемый разброс измеренных значений относительно расчетной кривой, представленной моделью MF2013_2, укладывается в одно стандартное отклонение.

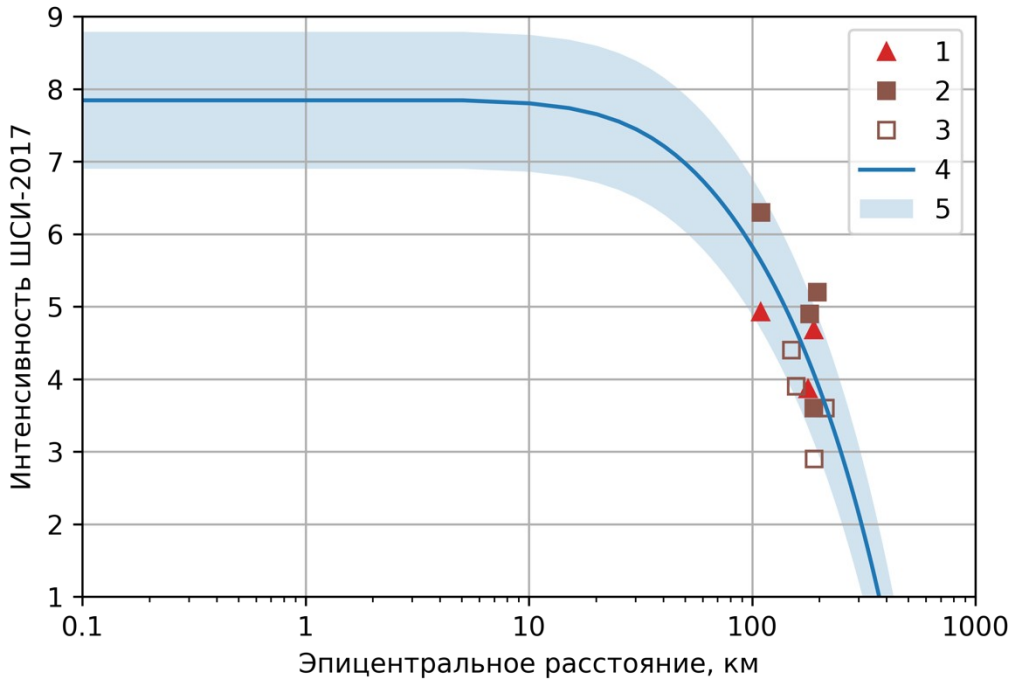

Рис. 13. Характеристика сейсмических воздействий, приведенная к ШСИ-2017, для землетрясения с Mw=5.9 и глубиной очага 34.8 км

1 – инструментальная интенсивность, *2* – интенсивность, оцененная по двум и более откликам, *3* – интенсивность, оцененная по одному отклику, *4* – модель затухания с расстоянием MF2013_2, *5* – область расчетных значений, включающая одно стандартное отклонение

Такое же соответствие было получено при рассмотрении землетрясения, произошедшего в Иркутской области 8 июня 2022 г. в 12:24 UTC. Моментная магнитуда землетрясения составила Mw=5.2, глубина очага – 10 км [Eqalert…, 2022b]. Сравнение

данных иллюстрирует рис. 14, в котором используется модель ASB2013* и обработанные отклики от населения. Оценка расчетной интенсивности производилась по такому же принципу: вначале строилась кривая затухания сейсмических ускорений согласно заданной конфигурации уравнения затухания, затем кривая приводилась к интенсивности согласно (4). Один выброс на рис. 14 носит, по всей видимости, случайный характер.

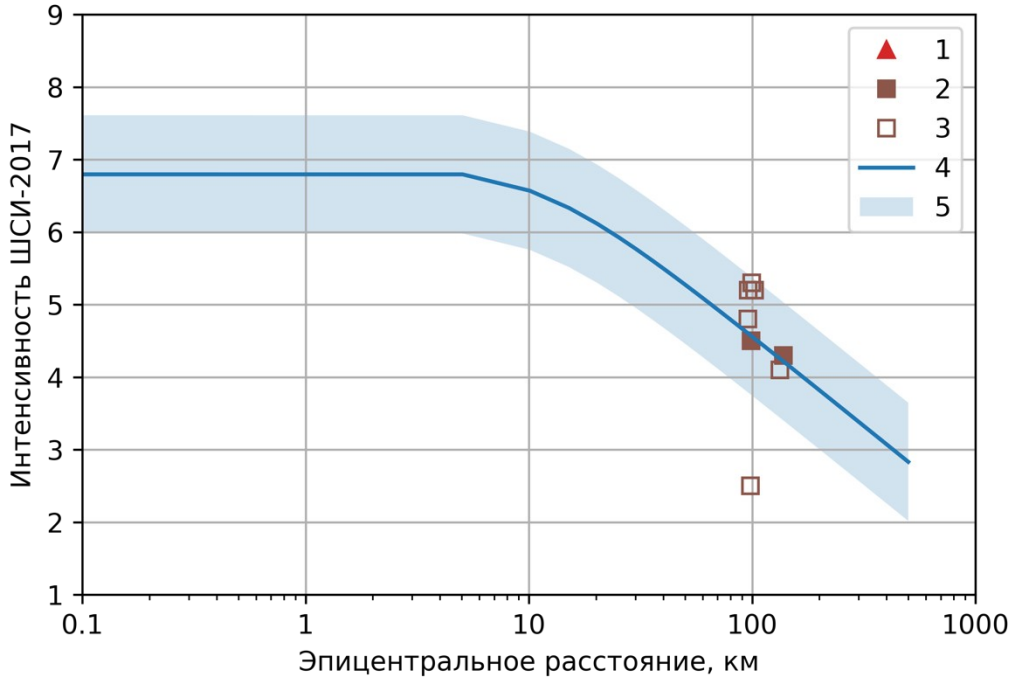

Рис. 14. Характеристика сейсмических воздействий, приведенная к ШСИ-2017, для землетрясения с Mw=5.2 и глубиной очага 10 км
1 – инструментальная интенсивность, *2* – интенсивность, оцененная по двум и более откликам, *3* – интенсивность, оцененная по одному отклику, *4* – модель затухания с расстоянием ASB2013*, *5* – область расчетных значений, включающая одно стандартное отклонение

Верификация «сахалинского» уравнения затухания реализована в ходе изучения очагов местных землетрясений (например, [*Коновалов и др.*, 2015; *Konovalov et al.*, 2018; *Коновалов и др.*, 2021; *Коновалов и др.*, 2023]).

К недостаткам моделей можно отнести их ограниченность применения по расстоянию – до 200 км. Мы решили ограничиться таким пространственным диапазоном для корректной параметризации коэффициента геометрического расхождения, хотя на практике можно было бы ввести несколько таких диапазонов и коэффициентов. Тем не менее, мы ожидаем, что на расстояниях свыше 200 км от эпицентра отклонения расчетных значений сейсмической интенсивности от реальной макросейсмической картины будут компенсироваться с помощью методов средневзвешенного анализа поля сейсмических воздействий, реализованных в рамках сервиса.

В целом, экспресс-верификацию некоторых моделей по небольшому набору измеренных данных можно считать удовлетворительной. Стоит отметить важность приверженности научного принципа при выборе и импортировании соответствующих моделей затухания из регионов с хорошей сейсмологической изученностью. В основу такого выбора положен сейсмотектонический принцип дискриминации характеристик затухания сейсмических воздействий. Приоритет при выборе моделей отдавался тем эмпирическим соотношениям, в которых использовалось гипоцентральное расстояние в качестве метрики расстояния. Также учитывалась воспроизводимость моделей с учетом неопределенности исходных параметров геологической среды и очагов землетрясений на

территории РФ. В будущем, при появлении новых эмпирических данных или новых региональных и глобальных моделей, коэффициенты уравнений будут уточнены.

Источники данных о землетрясении

Данные о параметрах землетрясения становятся доступными либо по результатам оперативной обработки инструментальных данных, либо после публикации результатов определений на Интернет-ресурсах отечественных и зарубежных сейсмологических дата-центров [United States…, 2022; GEOFON Program…, 2022; Федеральный…, 2022; European…, 2022]). Изучив доступность, скорость обработки данных и качество опубликованных результатов разными сейсмологическими дата-центрами, составлен их рейтинг, который по сути определяет приоритетность использования внешних данных:

1. Инструментальное измерение.
2. Геологическая служба США (USGS) [United States…, 2022].
3. Потсдамский центр наук о Земле (GFZ) [GEOFON Program…, 2022] / Европейско-средиземноморский сейсмологический центр (EMSC) [European…, 2022].

Другими словами, информация дата-центра, который первый опубликует очаговые параметры, будет далее использоваться в моделировании параметров сейсмических воздействий, однако если позже появляются данные от источника, расположенного в более приоритетном порядке, то расчеты уточняются с учетом новых данных. На практике такие действия контролируются (1) регулярными запросами данных с перечисленных источников, (2) проверкой наличия дубликатов при появлении нового решения и (3) выбором приоритетного решения при наличии дубликатов.

Российские сейсмологические дата-центры не включены в данный список в виду отсутствия на этих ресурсах API-интерфейса, позволяющего автоматически импортировать данные.

Инструментальные измерения в рамках сервиса Eqalert.ru охватывают только Сахалинскую область. Для других субъектов РФ используются внешние источники данных.

Так как крупные сейсмологические дата-центры определяют несколько типов магнитуды одного и того же землетрясения, мы применяем приоритетность магнитудной шкалы:

1. Моментная магнитуда, Mw.
2. Локальная магнитуда, ML.
3. Магнитуда, измеряемая по поверхностной волне, Ms.
4. Магнитуда, измеряемая по объемным волнам, mb.

Как правило, эмпирические соотношения затухания разрабатываются на основе моментной магнитуды, так как данная шкала магнитуд наилучшим образом характеризует размер очага землетрясения и не «насыщается» в отличие от других шкал [*Гусев, Мельникова,* 1990]. Поэтому, как только появляются данные о моментной магнитуде от заданного источника сейсмологической информации, происходит обновление данных и перерасчет сейсмических воздействий с указанием агентства, предоставившего значение моментной магнитуды. Если информация о моментной магнитуде не указана, то используется любая другая шкала в соответствии с рейтингом магнитудной шкалы, приведенным выше. При этом все энергетические оценки приводятся к моментной магнитуде на основе существующих межмагнитудных связей (таблица 2) [*Гусев, Мельникова,* 1990].

Таблица 2. Переводные коэффициенты межмагнитудных связей

связь\коэф-ты	*A*	*B*	*C*	*D*

ML-Mw	0.05±0.01	0.64±0.13	3.50±0.76	2.89±1.46
Ms-Mw	0.04±0.02	0.61±0.32	3.80±1.88	2.96±3.48
mb-Mw	0.53±0.23	8.06±3.66	41.6±19.5	67.7±34.3

Оценка моментной магнитуды по переходной зависимости осуществляется полиномиальной аппроксимацией кубического типа [*Коновалов и др.*, 2018]:

$$Mw = A * M^3 - B * M^2 + C * M - D, \quad (5)$$

где A, B, C, D – переводные коэффициенты (таблица 2), M – магнитуда.

Для примера, на рис. 15 показано сравнение магнитудных оценок по разным шкалам для Сахалинского и Курило-Охотского сейсмических регионов. В качестве энергетической величины M используется магнитуда указанного в скобках сейсмологического дата-центра. Тип магнитудной шкалы M определяется согласно правилу выбора магнитуды, описанному выше. Как правило, для слабых землетрясений с M~4-5 сейсмологические дата-центры публикуют магнитуду, измеряемую по объемным волнам (mb). Для более сильных землетрясений доступны оценки моментной магнитуды (Mw), которые наравне с другими типами магнитуд используются в настоящем сравнительном анализе в соответствии с рейтингом магнитудной шкалы.

В качестве агентства Sakhalin Emercom подразумевается ГУ МЧС России по Сахалинской области, которое в своих пресс-релизах приводит информацию оперативных определений СФ ГС РАН (ныне СФ ФИЦ ЕГС РАН). В приводимых сообщениях тип магнитуды не указан.

Несмотря на наблюдаемый разброс данных (рис. 15), практически все сейсмологические дата-центры приводят взаимосогласующиеся и несмещенные оценки магнитуды. Локальная магнитуда характеризуется наименьшим разбросом в паре региональных шкал и магнитуды USGS. Поэтому высокая степень приоритезации ML выглядит вполне обоснованной.

Следует заметить, что EMSC иногда публикует данные без указания типа магнитуды. Это происходит, когда агентство использует внешние источники данных. Такая же особенность встречается в сводках GFZ, причина этого до конца не ясна. Тем не менее, в уравнениях затухания публикуемая магнитуда без указания шкалы используется как моментная. По всей видимости, для слабых землетрясений это не так критично. В будущем для таких случаев потребуется разработка отдельных межмагнитудных переходных зависимостей для более корректного прогнозирования характеристик сейсмических воздействий.

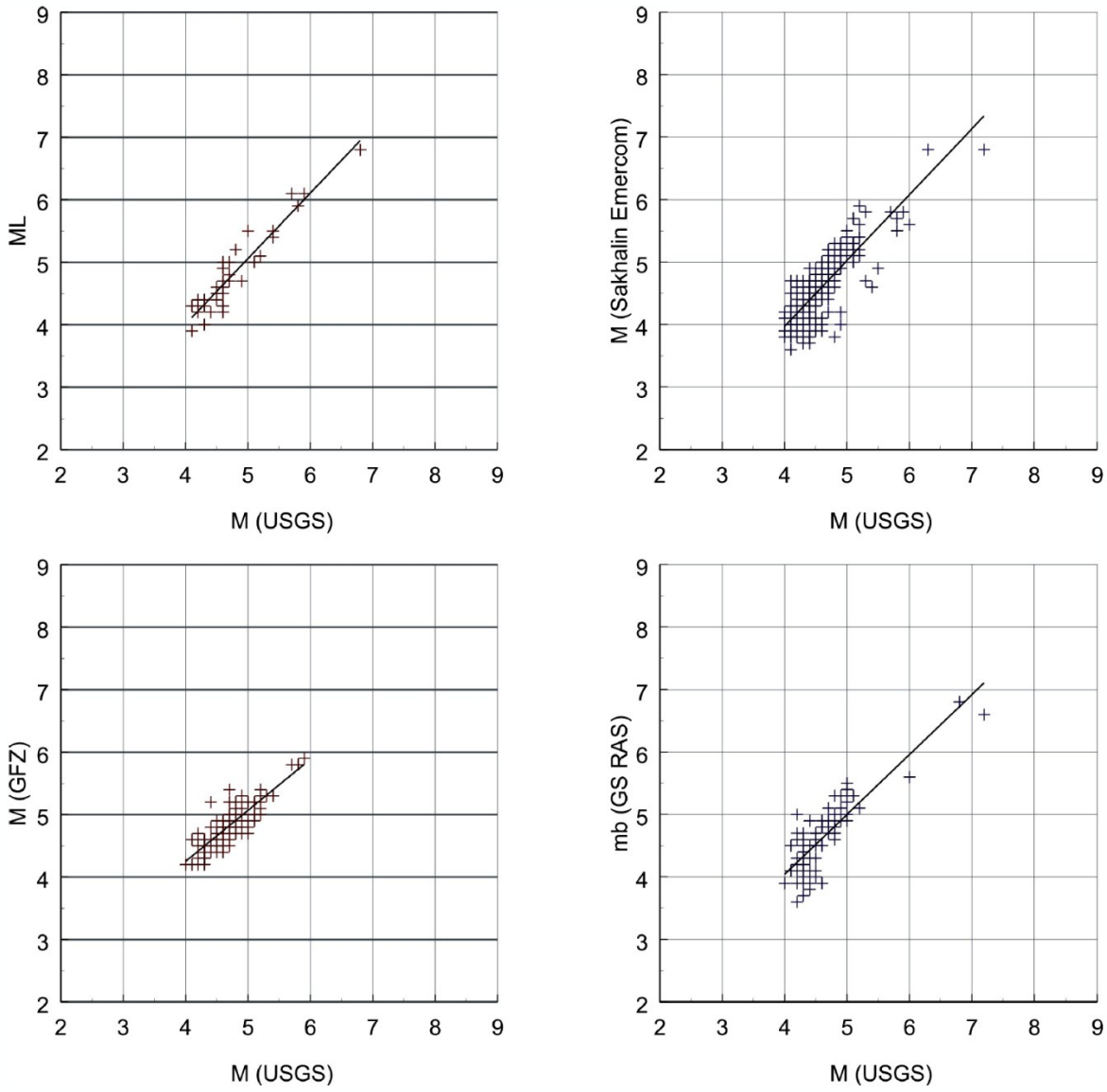

Рис. 15. Сравнение магнитуд, приводимых разными сейсмологическими дата-центрами. Используются данные землетрясений, произошедших в 2017 году в Сахалинском и Курило-Охотском сейсмических регионах

Программная реализация

Стэк технологий

Сервис Eqalert.ru построен по принципу микросервисной архитектуры. Каждый отдельный компонент выполняет свою функцию в непрерывном процессе обработки данных. Ключевыми компонентами являются:

1. Программный интерфейс для автоматического представления данных о сейсмических событиях и результатах расчёта [Geophystech…, 2022]. Программный код сервиса реализован на языке PHP. Программный интерфейс является связующим звеном продукта Eqalert.ru и реализует обмен данными между компонентами сервиса по технологии RESTfull API.

2. База данных. Этот компонент хранит информацию о всех полученных и рассчитанных данных. База данных построена на основе программного продукта с открытым исходным кодом MariaDB [MariaDB…, 2022].

3. Атомарные задачи для чтения данных из внешних источников. Эта служба в непрерывном режиме загружает данные о параметрах очагов землетрясений из сейсмологических дата-центров. Программный код реализован на языке PHP.

4. Служба расчёта сейсмических воздействий. Сервис представляет собой каскад последовательно выполняемых задач: верификация параметров очага, определение конфигурации закона затухания в локации очага землетрясения, расчёт пиковых ускорений грунта на пространственной координатной сети с шагом 500 метров, проверка расчётов и сохранение результатов в базу данных. Модули службы реализованы на языках программирования PHP, Julia и SQL.

5. Расчёт интенсивности на базе откликов от населения [*Коновалов и др.*, 2022].

6. Интерфейсы клиентов. Сервис поставляет информацию о сейсмических событий широкому кругу пользователей, а также является входной точкой для сбора откликов от населения. В настоящий момент продукт поддерживает три интерфейса: телеграм-бот (https://t.me/eqalert_ru_bot), веб-сайт (https://eqalert.ru/, https://github.com/geophystech/eqalert.ru), мобильные приложения для iOS (https://itunes.apple.com/ru/app/eqalert/id1448087679) и Android (https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.geophystech.eqalert). Программная реализация выполнена на PHP, java script, swift и java.

Инструментальные измерения

Данные о параметрах землетрясения (время, координаты и магнитуда) становятся доступными на сервисе после обработки инструментальных измерений или публикации информации о землетрясении крупными сейсмологическими агентствами. Инструментальные измерения в рамках сервиса охватывают только Сахалинскую область. Для других субъектов Российской Федерации используются внешние источники данных, которые поставляют оперативную информацию о произошедших землетрясениях.

Станции, интегрированные в сервис, передают зарегистрированную информацию в центр обработки данных в режиме, близком к реальному времени. Далее производятся автоматический расчет параметров землетрясений, проверка результатов оператором и выгрузка данных в API. Регистрирующее оборудование представлено акселерометрами и короткопериодными датчиками, а также станциями организаций-партнеров.

Технологичный стек автоматизированной системы процессинга сейсмологических данных и методология обработки представлены в серии научных публикаций:

- подбор и практическое обоснование скоростной модели по геологическим и геофизическим данным, оценка точности гипоцентральных определений [*Konovalov et al.*, 2012];
- калибровка локальной магнитуды [*Konovalov*, *Sychev*, 2014];
- разработка архитектуры автоматизированной системы обработки сейсмологических данных [*Stepnov et al.*, 2014];
- внедрение подсистемы автоматического расчёта параметров очага землетрясения [*Stepnov et al.*, 2017];
- апробация подсистемы автоматической обработки сейсмологических данных [*Konovalov et al.*, 2018];
- разработка и применение новых методов машинного обучения для обработки сейсмологических данных [*Stepnov et al.*, 2021];
- оценка представительности каталога землетрясений [*Konovalov et al.*, 2022b].

Импорт данных с USGS

Для сбора данных о параметрах землетрясений, публикуемых дата-центром USGS, используется удобный интерфейс прикладного программирования (API).

Применяются два эндпоинта API USGS:

1. [Earthquake…, 2022c].

2. [Earthquake…, 2022d].

Сбор данных представляет собой выполнение нескольких видов запроса к API USGS. Первый тип запроса получает недельный набор событий и запускается со следующими параметрами:

- format = geojson (указание на формат возвращаемых данных);
- starttime = текущее время минус одна неделя (формат: YYYY-MM-DD);
- minlatitude = минимальная широта событий;
- minlongitude = минимальная долгота событий;
- maxlatitude = максимальная широта событий;
- maxlongitude = максимальная долгота событий.

Все четыре параметра гео-координат получаются одним запросом из БД для каждой зоны мониторинга. Такое ограничение по координатам позволяет уменьшить количество лишних данных от API USGS.

Второй тип запроса получает дневной набор событий со всего мира, и фильтруется на соответствие зонам из-за невозможности отфильтровать данные через сам запрос.

Запросы на получение списка событий возвращают краткое содержание о каждом событии. Поэтому, чтобы собрать все необходимые данные по конкретному событию, генерируются отдельные запросы с указанием соответствующего идентификационного номера события (eventid).

Третий тип запроса, выгружающий список событий сразу за два месяца, срабатывает раз в день, по расписанию в 0 часов по UTC.

Также возможна загрузка события по требованию оператора через консольную утилиту.

Прежде чем приступить к выгрузке следующего месяца, ожидается завершение обработки всех задач в очередях.

Сервис Eqalert.ru по расписанию получает список событий, как описано выше, валидирует их, и передает каждое событие на стандартный фоновый обработчик событий.

Расписание запуска конфигурируется через переменную окружения USGS_EVENTS_LOADER_SCHEDULE, которая принимает настройку расписания в cron-подобном стиле.

Результат валидации влияет на то, будет обработано поступившее событие или нет. Событие поступает в обработку, если истины все перечисленные ниже условия валидации:

- У события определена зона.
- Одно из следующих условий истинно:
  - В БД отсутствует ID события.
  - В БД присутствует ID события, но контрольная сумма данных отличается от тех, что хранятся в БД.

Контрольная сумма (checksum) — это хеш функция md5 от всех значимых для сервиса данных события. Если данные события меняются, то хеш тоже сменится, и нам следует актуализировать наши данные в БД из пришедшего события.

Переменная checksum создаётся путем генерации md5 для строки, в виде конкатенации трёх параметров: id + properties.time + properties.updated.

Недельный запрос получает данные с некоторой задержкой, около часа, поэтому его использование в оперативных оценках само по себе малоэффективно. В добавок к нему запускается дневной запрос с событиями за последние 24 часа. Дневной запрос всегда возвращает самые свежие данные без задержек.

Таким образом, недельный запрос нужен для того, чтобы получать обновления по недавним событиям. Дневной запрос нужен, чтобы получать самые последние события как можно оперативнее.

Каждый из фидов опрашивается по порядку, сначала один, затем второй:

- Дневной опрашивается каждые 5 минут, начиная с 0 минут.

- Недельный опрашивается так, чтобы запросы не пересекались с дневным, то есть тоже каждые 5 минут, но добавляется еще +2 мин (в 2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 37, 42, 47, 52, 57 минут каждого часа).

Иногда USGS сначала выдает в фиде некоторые события, а затем, создает новое, которое их объединяет в одно. Объединенные события больше не отображаются в фиде, но их ID перечислены в новом, основном событии, в поле ids.

Таблица 3. Соотношение параметров USGS и Eqalert.ru при конвертировании

Eqalert.ru	**USGS**	**Расшифровка параметра**
report_id	id	Идентификационный номер события
sys_md5	md5(id + properties.time + properties.updated)	Системная переменная
depth	geometry.coordinates.2	Глубина очага (км)
depth_err	properties.products.origin.0.properties.vertical-error	Погрешность определения глубины (км)
hypo_gap	properties.gap	Азимутальная брешь (гр.)
lon_err	properties.products.origin.0.properties.horizontal-error	Погрешность определения долготы (км)
lat_err	properties.products.origin.0.properties.horizontal-error	Погрешность определения широты (км)
lon	geometry.coordinates.0	Долгота (гр.)
lat	geometry.coordinates.1	Широта (гр.)
mag	properties.mag	Магнитуда
mag_t	properties.magType – конвертируется в верхний регистр, удаляется начальный символ M.	Тип магнитуды
ph_num	properties.products.phase-data.0.properties.num-phases-used	Количество сейсмических фаз
sta_num	properties.nst	Число станций
rms	properties.rms	Среднеквадратичная невязка (с)
event_datetime	properties.time (с конвертацией в Y-M-D H:M:S)	Дата и время в очаге
action_attrcol	Определяется по properties.status. automatic = ARG; deleted = DEL; reviewed = UPD, все остальное NEW	Метод обработки
action_operator	Просто строка USGS	Оператор
action_datetime	Текущее системное время Y-M-D H:I	Текущее системное время
agency	Просто строка USGS	Агентство
station_near	Если задан properties.dmin, то конвертируется из градусов в километры	Ближайшая станция от эпицентра (км)

Импорт данных с EMSC и GFZ

Для предоставления данных о землетрясениях сервисы EMSC и GFZ реализуют API:

- EMSC: [FDSN…, 2022].
- GFZ: [GEOFON Program…, 2022].

Эти API выполнены по спецификации FDSN и предоставляют данные в разных форматах: QuakeML (xml), json (сокращенная версия данных) и txt/csv (ещё более сокращенная версия). Наиболее полный набор данных доступен в формате QuakeML, поэтому он более пригоден для импорта и используется в работе сервиса для автоматической выгрузки отчётов за разные периоды времени:

- за день – выполняется каждые 5 минут;
- за неделю – выполняется каждый час;
- за два месяца – выполняется каждый день.

Одна и та же выгрузка производится несколько раз, чтобы учесть все изменения в параметрах событий и актуализировать по ним БД. Однако выгрузки за длительные периоды очень ресурсоемкие, поэтому их приходится делать реже. Выгрузка с разных источников (EMSC и GFZ) происходит одновременно в параллельных процессах.

Для того, чтобы загрузить данные из внешнего источника в базу сервиса Eqalert.ru, выполняется маппинг данных источника на структуру БД. При этом источник предоставляет минимально необходимый набор данных (магнитуду, время в очаге и координаты гипоцентра землетрясения).

В процессе импорта события в формате QuakeML полученный XML преобразуется в многоуровневый ассоциативный массив, затем массив маппится на вновь созданный объект QuakeMlEvent, с которым далее работает сервис Eqalert.ru. Вместе с маппингом выполняется преобразование типов переменных (рис. 16)

```
return new QuakeMlEvent(
    id: $eventIdProcessor->process($array['attributes']['publicID']),
    origin: new Origin(
        depth: new Depth(
            meters: (float) $array['value']['origin']['depth']['value'],
            uncertainty: ArrayGet::floatOrNull($array,
'value.origin.depth.uncertainty'),
        ),
        quality: new Quality(
            usedPhaseCount: (int)
($array['value']['origin']['quality']['usedPhaseCount'] ?? 0),
            usedStationCount: (int)
($array['value']['origin']['quality']['usedStationCount'] ?? 0),
            azimuthalGap: (float)
$array['value']['origin']['quality']['usedStationCount'],
            standardError: ArrayGet::floatOrNull($array,
'value.origin.quality.standardError'),
        ),
        latitude: new Coordinate(
            degrees: (float) $array['value']['origin']['latitude']['value'],
            uncertainty: ArrayGet::floatOrNull($array,
'value.origin.latitude.uncertainty'),
        ),
        longitude: new Coordinate(
            degrees: (float)
$array['value']['origin']['longitude']['value'],
            uncertainty: ArrayGet::floatOrNull($array,
'value.origin.longitude.uncertainty'),
        ),
        time: new
DateTimeImmutable($array['value']['origin']['time']['value']),
        evaluationMode: ArrayGet::stringOrNull($array,
'value.origin.evaluationMode'),
    ),
    magnitude: new Magnitude(
        value: (float) $array['value']['magnitude']['mag']['value'],
        uncertainty: ArrayGet::floatOrNull($array,
'value.magnitude.mag.uncertainty'),
    ),
);
```

Рис. 16. Листинг фрагмента кода (в формате JSON), для создания нового массива данных

Для определения ID события источника приходится использовать соответствующий eventIdProcessor.

- GFZ: preg_replace("~.*geofon/~", '', $eventId);
- EMSC: preg_replace("~.*event/~", '', $eventId).

Это позволяет отбросить ненужную часть ID, которая не играет роли для нашего сервиса. Далее переменная QuakeMlEvent преобразуется в структуру для обработки сервисом Eqalert.ru (рис. 17).

```
class QuakeMlEventMapper
{
    public function toArray(QuakeMlEvent $event): array
    {
        $array = [
            'report_id' => $event->id,
            'sys_md5' => 'chacksum', // auto-generated md5 from array
            'depth' => $event->origin->depth->meters / 1000,
            'depth_err' => $event->origin->depth->uncertainty,
            'hypo_gap' => $event->origin->quality->azimuthalGap,
            'lon_err' => $event->origin->longitude->uncertainty,
            'lat_err' => $event->origin->latitude->uncertainty,
            'lon' => $event->origin->longitude->degrees,
            'lat' => $event->origin->latitude->degrees,
            'mag' => $event->magnitude->value,
            'ph_num' => $event->origin->quality->usedPhaseCount,
            'sta_num' => $event->origin->quality->usedStationCount,
            'rms' => $event->origin->quality->standardError,
        ];

        return $this->calcCheckSum($array);
    }

    private function calcCheckSum(array $array): array
    {
        $array['sys_md5'] = CheckSum::fromArray($array)->md5;

        return $array;
    }
}
```

Рис. 17. Листинг фрагмента кода (в формате JSON), преобразующего тип переменных

Стоит обратить внимание на то, что переменная sys_md5 формируется по всему набору данных, в отличии от USGS, где она формируется путем конкатенации трех параметров: id, properties.time и properties.updated. Это происходит из-за того, что у GFZ и EMSC нет возвращаемого параметра properties.updated.

Следует отметить, что GFZ в отличии от ESMC глубину очага передает в метрах, поэтому её приходится приводить к километрам при маппинге. Выгрузка отчетов производится по каждой зоне мониторинга за разные интервалы времени.

Сервис Eqalert.ru получает список событий по расписанию как описано выше, валидирует их и передает каждое из них на стандартный фоновый обработчик событий. Далее события обрабатываются асинхронно. Процесс валидации описан в предыдущей главе. После валидации происходит либо обновление старых данных события, либо создание нового события.

Объединение данных о землетрясениях с разных источников

При использовании различных источников данных о землетрясении, как правило появляются ситуации, когда данные об одном и том же событии поступают с разных дата-центров. Для этого необходимо различить дубликаты и выбрать нужное событие исходя из приоритезации внешних источников. В сервисе Eqalert.ru реализовано автоматическое распознавание дубликатов, при котором такие события показываются как одно землетрясение.

К сожалению, сейсмические события, предоставляемые различными внешними источниками (сервисами), не имеют единого, общего для всех идентификатора. Из-за этого сопоставление приходится делать, опираясь на параметры самого события, такие как:

- дата и время события;

- координаты эпицентра;
- глубина очага.

Высока вероятность, что у разных источников эти параметры могут отличаться. Поэтому они сравниваются не с конкретным значением, а с диапазоном.

Исходя из опыта ассоциации и объединения нескольких источников данных при решении прикладных задач (например, [*Konovalov et al.*, 2022a]) были заданы следующие диапазоны возможных отклонений:

- дата и время события: от -30 до +30 секунд;
- координаты эпицентра: от -150 км до +150 км;
- глубина очага: от -150 до +150 км.

При попадании всех параметров для двух событий (из разных источников) в диапазоны возможных отклонений они рассматриваются как одно событие, в противном случае – как разные.

Диапазон значений создает новую проблему для трех событий, которую необходимо решить: в результате может найтись два разных события, которые между собой не пересекаются, но оба пересекаются по диапазонам с новым событием (рис. 18).

Рис. 18. Диапазон «непересечения» старых и нового событий

"Старое событие 1" точно не пересекается со "Старым событием 2", они определенно являются разными событиями. Но к какому из них отнести "Новое событие"? Чтобы ответить на этот вопрос используется оценка, на сколько одно событие ближе по параметрам к другому событию. Рассчитав коэффициент соответствия, мы можем принять решение, к какому событию его отнести.

Коэффициент соответствия рассчитывается так, как показано на рис. 19.

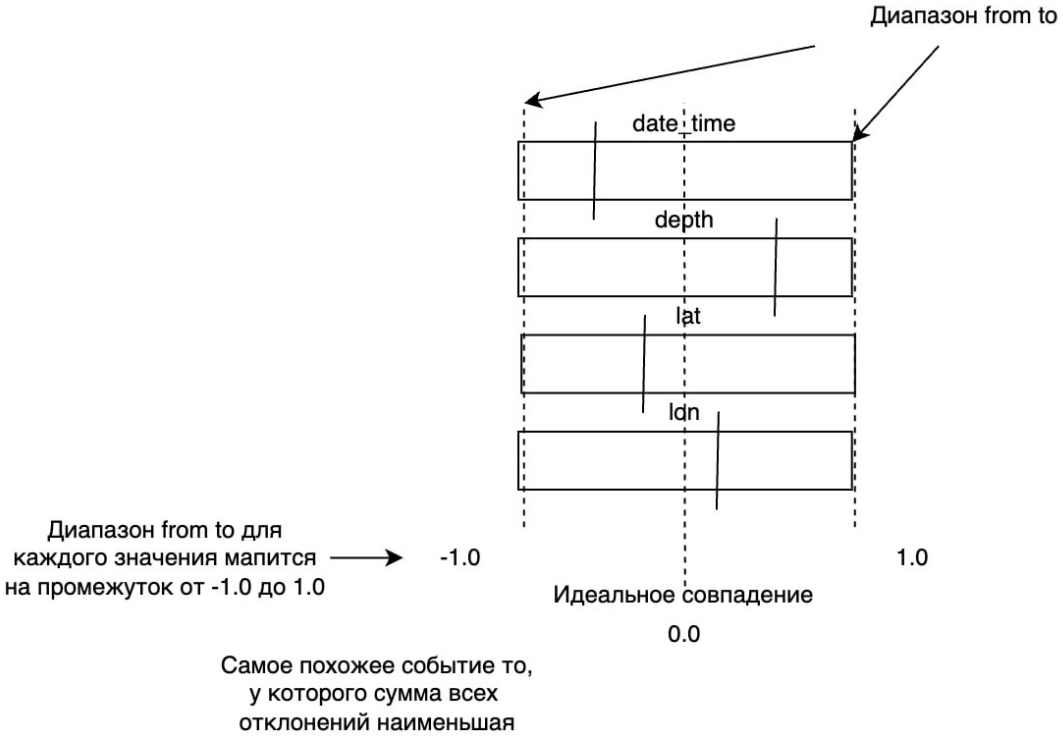

Рис. 19. Схема расчёта коэффициента соответствия

Идеальное совпадение – это когда все четыре параметра (дата и время события, координаты эпицентра и глубина очага) совпали полностью со старым событием. Короткие вертикальные линии на рис. 19 – это демонстрация наложения на диапазон отклонения параметров нового события.

Чем ближе "Короткие вертикальные черточки" к центру (идеальному совпадению), тем больше коэффициент соответствия нового события. Коэффициент отклонения для каждого из параметров транслируется на шкалу от -1 до 1 (либо от -100 до 100%). Мы суммируем абсолютные значения всех четырёх коэффициентов отклонений, чтобы получить суммарный коэффициент, который определяет степень соответствия. Пример запроса к БД с расчетом коэффициента отклонения, называемого в коде delta, показан на рис. 20.

```
SELECT
        r.id,
        r.unique_key,
        r.source_name,
        (
                (ABS(UNIX_TIMESTAMP(lv.event_datetime) -
UNIX_TIMESTAMP(':dateTime')) / 10 * 100)
                + (ABS(lv.depth - :depth) / 50 * 100)
                + (ABS(lv.lat - :lat) / 0.5 * 100)
                + (ABS(lv.lon - :lon) / 0.5 * 100)
        ) delta
FROM
        reports AS r
        JOIN loc_values AS lv ON lv.report_id = r.id
WHERE
        r.source_name != :inputReportSourceName
        AND r.has_delete = 0
        AND r.is_primary = 1
        AND lv.event_datetime BETWEEN ':eventDatetimeMin' AND
':eventDatetimeMax'
        AND lv.lat BETWEEN ':latMin' AND ':latMax'
        AND lv.lon BETWEEN ':lonMin' AND ':lonMax'
        AND lv.depth BETWEEN ':depthMin' AND ':depthMax'
ORDER BY
        delta ASC
LIMIT 1
```

Рис. 20. Листинг фрагмента кода (в формате JSON) для расчета коэффициента отклонения

Минимальные и максимальные значения, приведенные на рис. 20, рассчитываются из параметров нового события с применением описанных ранее диапазонов. Из запроса видно как рассчитываются коэффициенты и складываются их модули. Результат записывается в колонку delta. Также видно, что производится сортировка по параметру delta и достается первый элемент с начала списка. Этот первый элемент и есть то самое событие, которое больше всего похоже на наше новое событие.

Из нескольких одинаковых событий одно будет отображаться как основное. Для этого используется таблица приоритетов источников данных, приведенная раннее.

Кроме того, реализована процедура ассоциации нескольких событий после обновления данных о событиях, приводимых внешними источниками данных.

Конечно, существует вероятность того, что два одинаковых события будут сильно отличаться по параметрам, публикуемым разными дата-центрами. Однако мы считаем такие случае маловероятными. Возможны также случаи парных землетрясений, когда за коротких промежуток времени в одном и том же месте происходят два землетрясения с одинаковой магнитудой. Такие случаи тоже редко встречаются. Если все же такое произойдет, то на этот случай предусмотрен режим ручного удаления и объединения событий.

Расчет поля сейсмических воздействий на координатной сетке

Расчетный модуль реализован на высокопроизводительном языке программирования Julia [GitHub…, 2022c]. Расчет поля сейсмических воздействий выполняется на сетке с шагом около 500 м. На этой же сетке заданы значения скорости S-волн в грунте согласно глобальной карте. Параметры сетки заданы в конфигурационном файле. При запуске модуля загружается сетка из конфигурационного файла. В заданных точках выполняется расчет пикововго ускорения грунта по уравнению заутхания, соответствующему зоне, в которой локализован эпицентр землетряения. Для оперативности вычислений область расчета ограничивается изосейстой I=2.5. Пиковое усокрение рассчитывается в %g (ускорение свободного падения). Модуль расчета интегрирован с API сервиса Eqalert.ru.

Обработка откликов

В сервисе реализован сбор откликов от населения через интернет. Обратную связь от населения сервис получает с помощью опросного листа «Ощутили землетрясение?». Ответив на несколько вопросов анкеты, пользователи помогают уточнить интенсивность колебаний в области воздействия землетрясения в соответствии с методикой DYFI [*Wald et al.*, 1999]. Ответы респондентов в каждом населенном пункте приводятся к взвешенной сумме CWS с учетом различных индикаторов сейсмических колебаний: ощущение людьми, положение предметов и мебели в пространстве, характер повреждения зданий. Полученные оценки приводятся к интенсивности ШСИ-2017 с округлением до десятых.

При заполнении формы респондент может выбрать из списка землетрясение, с которым, по его мнению, связаны ощутимые колебания. С целью обработки ранних откликов, когда еще недоступна информация о произошедшем землетрясении, разработан алгоритм автоматического поиска и привязки неассоциированных откликов к конкретному сейсмическому событию после появления о нем информации. При обработке откликов учитывается геолокация респондента и производится привязка полученных ответов к конкретному населенному пункту.

Более подробная информация о методике обработки откликов приведена в [*Коновалов и др.*, 2022].

Примеры реальных землетрясений

После того, как в БД сервиса появляется новое событие, запускается расчет поля сейсмических воздействий. Для представления рассчитанных значений сервис реализует собственное API. Клиентами API выступают Web-браузер, мобильные приложения, Telegram-бот, а также аппаратно-программный комплекс «Безопасный город» в Сахалинской области.

Ниже приведены примеры карт сотрясаемости (рис. 21-23), сгенерированных через Web-браузер сервиса Eqalert.ru. Отрисовка карт сотрясаемости выполняется в виде изолиний, соответствующих баллам ШСИ-2017. В качестве подложек используются Яндекс.Карты и Google Maps.

В качестве тестовых землетрясений рассмотрены недавние события, произошедшие в разных сейсмогенных районах РФ. Зелеными квадратиками на картах отмечены населенные пункты, из которых поступили отклики от населения. Отклики обрабатываются автоматически [*Коновалов и др.*, 2022].

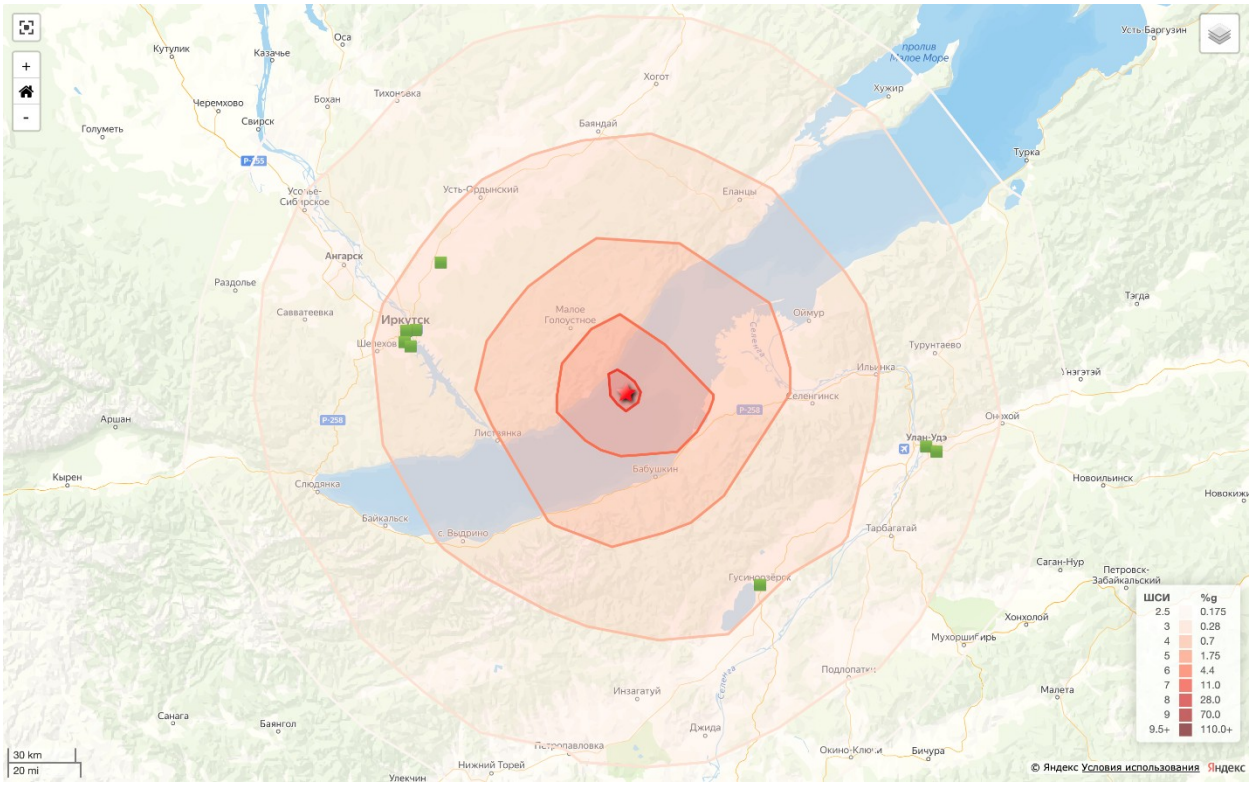

Рис. 21. Карта сотрясаемости, сгенерированная Web-браузером [Eqalert…, 2022b], после возникновения землетрясения 8 июня 2022 г. (Mw=5.2) в Иркутской области

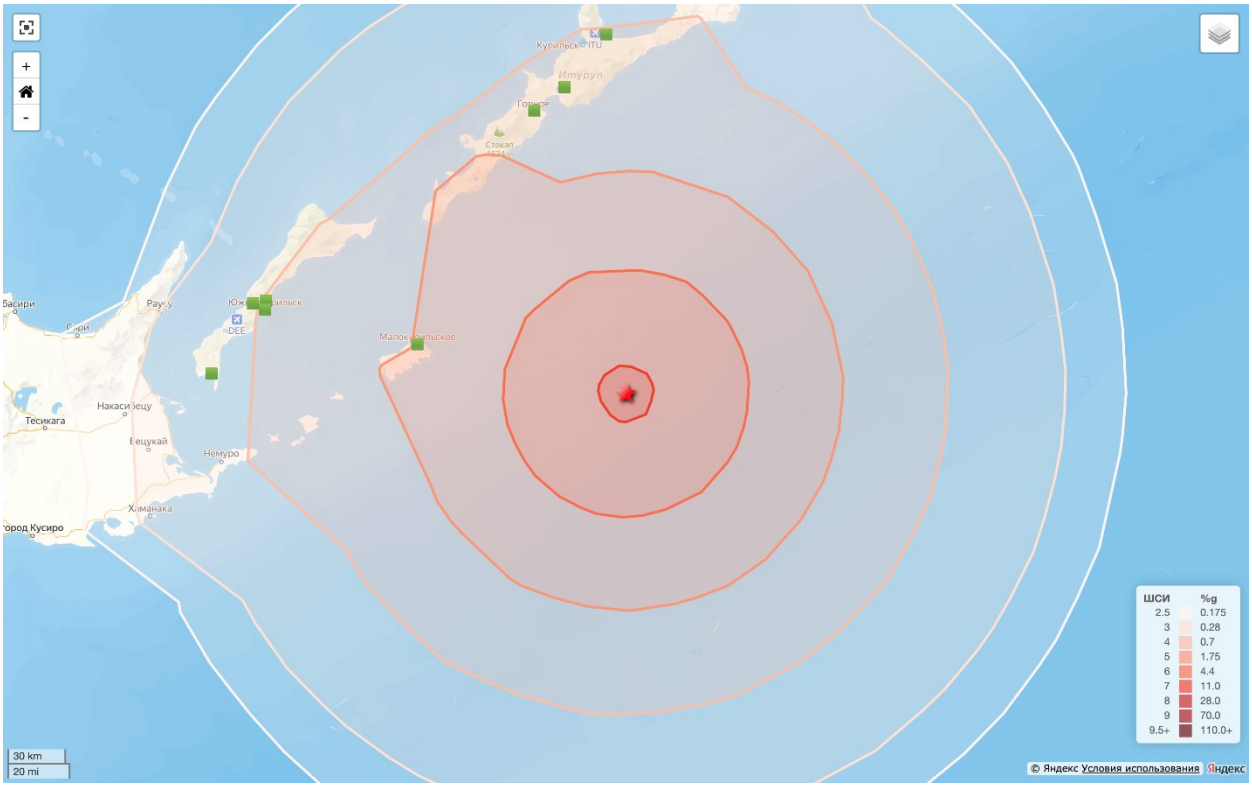

Рис. 22. Карта сотрясаемости, сгенерированная Web-браузером [Eqalert.ru, 2022a], после возникновения 7 августа 2022 г. (ML=6.2) в районе южных Курильских островов Сахалинской области

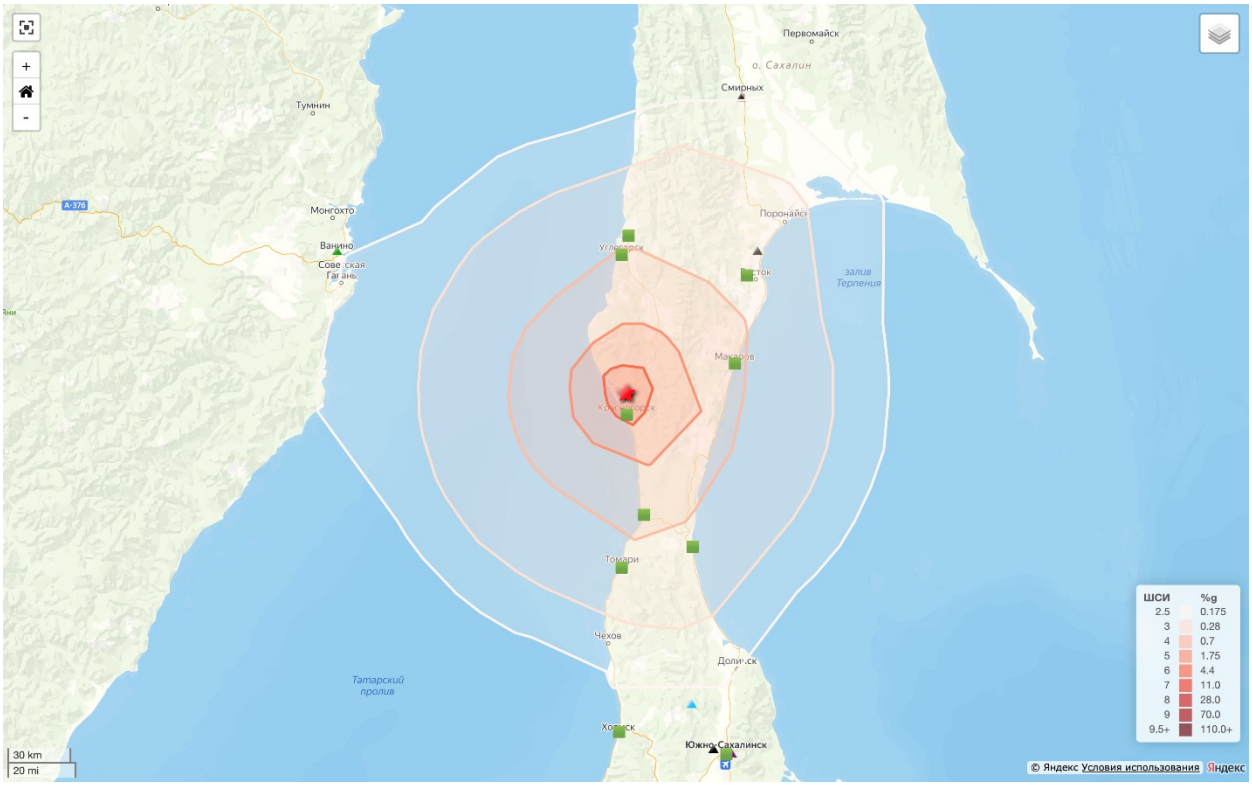

Рис. 23. Карта сотрясаемости, сгенерированная Web-браузером [Eqalert.ru, 2022c], после возникновения землетрясения 8 февраля 2022 г. (ML=5.3) на Сахалине

Заключение

В настоящей статье продемонстрирован первый и пока единственный в России сейсмологический сервис для населения, экстренных служб и ученых, генерирующий карты сотрясаемости в единицах пикового ускорения грунта. Клиентская часть сервиса реализована в виде интернет-сайта, мобильного приложения для различных операционных систем и Telegram-бота. Все программные решения являются разработками отечественной IT-компании. Некоторая часть кода представлена в открытом доступе; соответствующие ссылки приведены в тексте статьи. В статье представлены методологические и технологические аспекты в работе сервиса.

В рамках сервиса реализована интеграция с базами данных землетрясений. В качестве внешних источников используются сейсмологические дата-центры USGS, EMSC и GFZ, публикующие информацию о землетрясениях с использованием интерфейса прикладного программирования. Использование различных внешних источников позволяет повысить оперативность расчета поля сейсмических воздействий. Тем самым обеспечивается и полнота информации. Для корректного импорта данных реализованы алгоритмы, учитывающие приоритетность источников и предотвращающие возможное дублирование одного и того же события. Все магнитудные оценки сводятся к моментной шкале, что регулируется соответствующими межмагнитудными соотношениями.

Определены конфигурации уравнений затухания пикового ускорения грунта для всех субъектов РФ. В основу выбора уравнений положен сейсмотектонический принцип дискриминации характеристик затухания сейсмических воздействий. Приоритет при выборе моделей отдавался эмпирическим соотношениям, в которых использовалось гипоцентральное расстояние в качестве метрики расстояния. Также учитывалась воспроизводимость моделей с учетом неопределенности исходных параметров геологической среды и очагов землетрясений на территории РФ. Выполнена экспресс-верификация отобранных моделей с использованием данных, полученных за последние два года, включая инструментальные измерения и отклики от населения. В будущем, при

появлении новых эмпирических данных или новых региональных и глобальных моделей затухания, коэффициенты уравнений будут уточнены.

В сейсмологическом сервисе Eqalert.ru реализован уникальный программный интерфейс, который позволяет использовать расчеты автоматизированными системами и службами.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (договор 29ГРСОПР-С7-I5/63664 от 25.11.2020 г., заявка Р-83368).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.

Коновалов А.В., Степнов А.А., Клачков В.А., Манайчев К.А., Сабуров М.А., Вторушин А.Г., Гаврилов А.В., Томилев Д.Е. Оперативный прогноз сейсмических воздействий на территории Сахалинской области // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска» Т. 1 / Под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 34.

Коновалов А.В., Манайчев К.А., Степнов А.А., Гаврилов А.В. Региональная модель затухания сильных движений грунта для о. Сахалин // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45, № 1. С. 19–30. https://doi.org/10.21455/VIS2018.1-2

Коновалов А.В., Степнова Ю.А., Степнов А.А. Сильное землетрясение 05.02.2022 (ML 5.5) вблизи нефтегазового месторождения на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42, № 1. С. 60–75. DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-1-60-75

Коновалов А.В., Ханчук А.И., Степнов А.А., Степнова Ю.А. Сильное землетрясение на Сахалине 13.09.2020 // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 497, № 1. С. 67–70. https://doi.org/10.31857/S2686739721030075

Коновалов А.В., Степнов А.А. и др. Новые методы и технологии оперативной оценки сейсмических воздействий на примере о. Сахалин // Вопросы инженерной сейсмологии. Т. 49, № 3. 2022. С. 54–74. DOI: 10.21455/VIS2022.3-3

Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет // М.: Научный мир, 2009. 284 с.

Предеин П.А. Затухание сейсмических волн в центральной части Байкальской рифтовой системы / Диссертация на соискание ученой степени к.г.-м.н. 2022.

Свидетельство на программу ЭВМ: https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=F00690DE-5FEE-4F0D-9131-C12EF2EC1915. Дата обращения 01.12.2022 г.

Федеральный исследовательский центр: «Единая геофизическая служба Российской академии наук». 2022. URL: http://www.gsras.ru/new/ssd_news.htm/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Эртелева О.О. Параметры сейсмических колебаний в эпицентральных областях землетрясений / Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. 2019.

Abrahamson N.A., Silva W.J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. Seismological Research Letters. 1997. 68(1): 94–127.

Abrahamson N.A, Silva W.J. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. Earthquake Spectra. 2008. 24(1): 67–97. doi: 10.1193/1.2924360

Abrahamson N.A. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthquake Spectra. 2014. 30(3): 1025–1055. doi: 10.1193/070913EQS198M

Adams J., Weichert D.H., Halchuk S., Basham P.W. Trial seismic hazard map of Canada 1995: preliminary values for selected Canadian cities. 1995. URL: https://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/publications/STPublications_PublicationsST/194/194973/of_3029.pdf

Akkar S., Sandkkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East // Bull. of Earthq. Engineering. 2014. 12(1): 359–387. doi: 10.1007/s10518-013-9461-4

Allen T.I., Wald D.J. Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (VS30) and amplification around the globe. U.S. Geological Survey. 2007 Open-File Report 2007-1357.

Atkinson G.M., Boore D.M. Ground-motion relations for eastern North America. Bulletin of the Seismological Society of America. 1995. 85(1): 17–30.

Atkinson G.M. Ground Motion Relations for Use in Eastern Hazard Analyses. URL: https://www.caee.ca/7CCEEpdf/119%20-%20Ground%20Motion%20Relations%20for%20Use%20in%20Eastern%20Hazard%20Analyses...%20G.M.%20Atkinson.pdf

Barosh P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings, U.S. Geol Surv. 1969. Bull. 1279.

Campbell K.W., Bozorgnia Y. Campbell-Bozorgnia Next Generation Attenuation (NGA) relations for PGA, PGV and spectral acceleration: A progress report // Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (San Francisco, April 18 - 22, 2006). San Francisco, USA, 2006. Paper No. 906.

Douglas J. Ground motion prediction equations 1964-2016 / Department of Civil and Environmental Engineering. University of Strathclyde, Glasgow. 2016. URL: www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.pdf/

Earthquake Hazards Program: PAGER Scientific Background. 2022a. URL: https://earthquake.usgs.gov/data/pager/background.php/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Earthquake Hazards Program: Search Earthquake Catalog. 2022b. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000i8vz/executive/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Earthquake Hazards Program: Search Earthquake Catalog. 2022c. URL: https://earthquake.usgs.gov/fdsnws/event/1/query/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Earthquake Hazards Program: Search Earthquake Catalog. 2022d. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/feed/v1.0/summary/2.5_hour.geojson/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Eqalert.ru. Event EA4k5gbD. 2022a. URL: https://eqalert.ru/events/EA4k5gbD/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Eqalert.ru. Event gZpJpVAN. 2022b. URL: https://eqalert.ru/events/gZpJpVAN/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Eqalert.ru. Event 0b8GkXZz. 2022c. URL: https://eqalert.ru/events/0b8GkXZz/. Дата обращения 01.12.2022 г.

European Mediterranean Seismological Centre. 2022. URL: https://www.emsc-csem.org/#2/. Дата обращения 01.12.2022 г.

FDSN WS-EVENT raw demo access. 2022. URL: https://www.seismicportal.eu/fdsn-wsevent.html/. Дата обращения 01.12.2022 г.

García D., Wald D.J., Hearne M.G. A global earthquake discrimination scheme to optimize ground-motion prediction equation selection. Bull. Seismol. Soc. Am. 2012. 102(1): 185–203

Geophystech LLC Seismo-API service. 2022. URL: https://rest-api.eqalert.ru/. Дата обращения 01.12.2022 г.

GEOFON Program. 2022. URL: https://www.gfz-potsdam.de/en/home/. Дата обращения 01.12.2022 г.

GitHub: U.S. Geological Survey: Shakemap. 2022a. URL: https://github.com/usgs/shakemap/. Дата обращения 01.12.2022 г.

GitHub: Global Earthquake Model. OpenQuake's Engine for Seismic Hazard and Risk Analysis. 2022b. URL: https://github.com/gem/oq-engine/. Дата обращения 01.12.2022 г.

GitHub: GEOPHYSTECH LLC: Ground Motion. 2022c URL: https://github.com/geophystech/GroundMotion.jl/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Japan Meteorological Agency. Earthquake Information issued by JMA. 2022 URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/en/guide/earthinfo.html/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Jorjiashvili N., Shengelia I., Godoladze T., Gunia., Akubardia D. Ground motion prediction equations based on shallow crustal earthquakes in Georgia and the surrounding Caucasus. Earthq Sci. 2022. 35(6): 497–509. doi: 10.1016/j.eqs.2022.12.001

Konovalov A.V., Stepnov A.A., Patrikeev V.N. SEISAN software application for developing an automated seismological data analysis workstation. Seism. Instr. 2012. 48: 270–281. https://doi.org/10.3103/S0747923912030073

Khanchuk, A.I., Safonov, D.A., Radziminovich, Y.B. et al. The largest recent earthquake in the Upper Amur region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. Dokl. Earth Sc. 2012. 445: 916–919. https://doi.org/10.1134/S1028334X12070227

Konovalov A.V., Sychev A.S. A calibration curve of local magnitude and intermagnitude relations for northern Sakhalin. J. Volcanolog. Seismol. 2014. 8: 390–400. https://doi.org/10.1134/S0742046314060050

Konovalov A.V., Safonov D.A., Stepnov A.A., Kozhurin A.I., Pavlov A.S., Gavrilov A.V., Manaychev K.A., Takahashi H., Ichianagi M. The Mw=5.8 14 August 2016 Middle Sakhalin Earthquake on a Boundary Between Okhotsk and Eurasian (Amurian) Plates. Journal of Seismology. 2018. 22(4): 943–955. https://doi.org/10.1007/s10950-018-9744-y

Konovalov A.V., Stepnov A.A., Samsonov G.A. A Logit-Based Binary Classifier of Tsunamigenic Earthquakes for the Northwestern Pacific Ocean. Pure Appl. Geophys. 2022a. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03194-7

Konovalov A.V., Stepnov A.A., Turuntaev S.B. Possible Connection Between Recent Seismicity and Fluid Injection in the Offshore Oil and Gas Field Area of Sakhalin Island, Russia. Pure Appl. Geophys. 2022b. 179: 4233–4243. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03006-y

MariaDB Server: The open source relational database. 2022. URL: https://mariadb.org/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Michelini A., Faenza L., Lanzano G., Lauciani V., Jozinović D., Puglia R., Luzi L. The New ShakeMap in Italy: Progress and Advances in the Last 10 Yr. Seismological Research Letters. 2020. 91(1): 317–333. doi.org/10.1785/0220190130

Morikawa N., Fujiwara H. A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake. Journal of Disaster Research. 2013. 8(5): 878–88. doi: 10.20965/jdr.2013.p0878

Nagamatsu S., Goltz J., Matsukawa A. Societal issues in urban earthquake disasters: Lessons of the 2018 Osaka Earthquake. 2018.

Pacific Earthquake Engineering Research Centre, NGA-East: Median Ground Motion Models for the Central and Eastern North America Region, PEER Report No. 2015/04 University of California, Berkeley PEER. 2015. URL: http://peer.berkeley.edu/ngawest/index.html

Schulte S.M., Mooney W.D. An updated global earthquake catalogue for stable continental regions: reassessing the correlation with ancient rifts. Geophysical Journal International. 2005. 161(3): 707–721. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02554.x

ShakeMap program: ShakeMap Processing. 2022. URL: https://usgs.github.io/shakemap/manual3_5/tg_processing.html/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V. et al. New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data. Seism. Instr. 2014. 50: 67–74. https://doi.org/10.3103/S0747923914010083

Stepnov A.A., Konovalov A.V., Gavrilov A.V. et al. Earthworm-based automatic system for real-time calculation of local earthquake source parameters. Seism. Instr. 2017. 53: 267–279. https://doi.org/10.3103/S0747923917040107

Stepnov A, Chernykh V, Konovalov A. The Seismo-Performer: A Novel Machine Learning Approach for General and Efficient Seismic Phase Recognition from Local Earthquakes in Real Time. Sensors. 2021. 21(18): 6290. https://doi.org/10.3390/s21186290

Thompson E.M., Worden C.B. Estimating Rupture Distances without a Rupture. Bulletin of the Seismological Society of America. 2017. 108(1): 371–379. doi: https://doi.org/10.1785/0120170174

United States Geological Survey. 2022. URL: https://www.usgs.gov/. Дата обращения 01.12.2022 г.

Wald D.J., Quitoriano V., Dengler L.A., Dewey J.W. Utilization of the internet for rapid community intensity maps. Seismol. Res. Lett. 1999. 70: 680–697.

Wong Y.L., Zhao J.X., Luo Q. Attenuation characteristics of ground motions in northern China. Earthq. Engin. Engin. Vib. 2002. 1: 161–166. https://doi.org/10.1007/s11803-002-0062-5

Сведения об авторах

КОНОВАЛОВ Алексей Валерьевич – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: a.konovalov@geophystech.ru

СТЕПНОВ Андрей Александрович – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: a.stepnov@geophystech.ru

ДМИТРИЕНКО Роман Юрьевич – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: office@geophystech.ru

ОРЛИН Илья Дмитриевич – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: office@geophystech.ru

СЫЧЕВ Андрей Сергеевич – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: a.sychov@geophystech.ru

ЦОЙ Александр Тэсуевич – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: a.tsoy@geophystech.ru

БОГДАНОВ Евгений Сергеевич – ООО «Геофизические технологии». Россия, 693006, Сахалинская обл., г. Южно-Сахалинск, ул. Пуркаева, д. 116, оф. 704 (ТОЦ «Меридиан»). E-mail: e.bogdanov@geophystech.ru

PGA shaking maps in Russia by Eqalert.ru seismological service

A.V. Konovalov, A.A. Stepnov, R.Yu. Dmitrienko, I.D. Orlin, A.S. Sychev, A.T. Tsoy, E.S. Bogdanov

Geophysical Technologies LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Corresponding author: A.V. Konovalov, e-mail: a.konovalov@geophystech.ru

Abstract. The article presents the methodological aspects of the creation and operation of the first domestic seismological service in Russia, which supplies operational information about earthquakes and seismic effects all over the country. Specially for this, the zones with seismic risk were determined, and for each of them the corresponding attenuation equation of the peak ground acceleration was selected from the published global and regional models. The selection of equations was carried out on the basis of the seismotectonic principle of discrimination of seismogenic areas of the Earth and the reproducibility of calculations under conditions of an acute shortage of geophysical information. The seismological service supports three interfaces: telegram bot (https://t.me/eqalert_ru_bot), website (https://eqalert.ru/), mobile apps for iOS (https://itunes.apple.com/ ru/app/eqalert/id1448087679) and Android (https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.geophystech.eqalert). The software implementation was made on PHP, java script, swift and java programming languages. The key component of the service is an application programming interface (API) for automatic presentation of the data. The programming interface is the connecting link of the service and implements the interaction between major service components using the RESTfull API technology. The service presented in this article allows producing of the shaking maps quickly and accurately. Accuracy is achieved by using regionalized ground motion

prediction equations, and efficiency is achieved by using several sources of the earthquake data. For users geospatial characteristics of the ground shaking are presented in the form of shaking maps, while automated systems and services receive a complete set of data using API.

Keywords: earthquake, monitoring, shaking map, GMPE, strong ground motion, PGA, automated service, Russia

Financial support

The study was financially supported by the Innovation Promotion Fund (Contract 29GRSOPR- C7-I5/63664 dated November 25, 2020, Application R-83368).

Ethics declarations

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

KONOVALOV Alexey Valerievich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: a.konovalov@geophystech.ru

STEPNOV Andrey Alexandrovich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: a.stepnov@geophystech.ru

DMITRIENKO Roman Yurievich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: office@geophystech.ru

ORLIN Ilya Dmitrievich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: office@geophystech.ru

SYCHEV Andrey Sergeevich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: a.sychov@geophystech.ru

TSOY Alexander Tesuevich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: a.tsoy@geophystech.ru

BOGDANOV Evgeny Sergeevich – Geophysical Technologies LLC. Russia, 693006, Yuzhno-Sakhalinsk, Purkaev st. 116, office 704 (Meridian Office center). E-mail: e.bogdanov@geophystech.ru