

УДК 550.34

## СЕТЬ KISS В 2015–2016 гг.: КАТАЛОГИ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ С ОПЕРАТИВНЫМИ ОЦЕНКАМИ ПО ПОСТОЯННОЙ СЕТИ

© 2024 г. С. Л. Сеньюков<sup>1,3\*</sup>, Д. В. Дрознин<sup>1,3</sup>,  
С. Я. Дрознина<sup>1</sup>, Н. М. Шапиро<sup>2</sup>, И. Н. Нуждина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup>Институт наук о Земле, г. Гренобль, Франция

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: ssl@emsd.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 03.09.2023 г.

Принята к публикации 03.09.2023 г.

Для детального изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов (КГВ) на полуострове Камчатка летом 2015 г. на период времени продолжительностью один год было установлено 77 временных сейсмических станций в рамках международного сотрудничества ученых нескольких групп из России, Франции и Германии. Одним из результатов эксперимента KISS (Klyuchevskoy Investigation – Seismic Structure of an extraordinary volcanic system) стал итоговый каталог по совместным данным временных станций и постоянной сети Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Каталог включает 2136 событий, в том числе добавлено 560 землетрясений, для корректной обработки которых данных постоянной сети было недостаточно. Каталог в формате “xlsx” и станционный бюллетень в формате “isf” опубликованы в дополнительных материалах к предлагаемой статье<sup>a</sup>. Проведен сравнительный анализ совместных решений двух каталогов, полученных только по данным постоянных станций сети Камчатского филиала и более плотной объединенной со станциями KISS сейсмической сети.

*Ключевые слова:* временная сеть станций, сейсмическое зондирование, сейсмический мониторинг, каталог землетрясений.

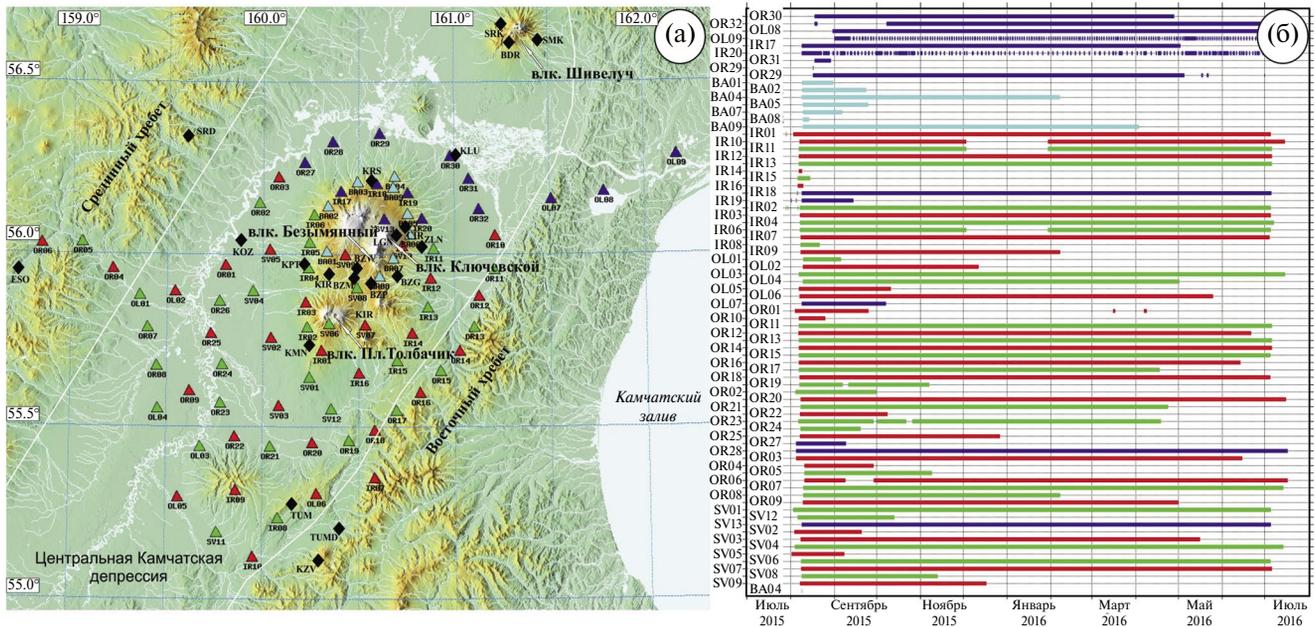
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724020113>, EDN: BHOFCFN

### ВВЕДЕНИЕ

Главной целью установки сети сейсмических станций в рамках проекта KISS (Klyuchevskoy Investigation – Seismic Structure of an extraordinary volcanic system) было изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов (КГВ) [Shapiro et al., 2015; 2017a]. КГВ – крупнейший центр современного вулканизма в мире, расположен в восточной части России на полуострове Камчатка, вблизи места стыка северной оконечности Курило-Камчатской зоны субдукции, западной части Алеутской дуги и северо-западного сегмента Гавайско-Императорской цепи подводных гор. В региональном плане Ключевская

группа находится в северной части Центральной Камчатской депрессии между Срединным и Восточным хребтами (рис. 1) [Брайцева и др., 1970]. КГВ включает 13 действующих и потухших вулканов. Средний объем изверженных пород во времени за последние 10 000 лет оценивается примерно как один кубический метр в секунду [Действующие ..., 1991]. Наиболее сильная эруптивная деятельность за последние десятилетия наблюдалась на вулканах Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Все они считаются одними из самых активных вулканов мира (см., например, работы [Fedotov et al., 2010; Laverov, 2005; Ponomareva et al., 2007]), но при этом они имеют совершенно разные режимы извержения и составы. Некоторые из вулканов КГВ эпизодически проявляют сейсмическую и/или фумарольную активность; другие считаются спящими или потухшими, но все они

<sup>a</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0002333724020113 для авторизованных пользователей.



**Рис. 1.** Расположение станций Камчатской региональной сети (международный код сети – KAGSR) показано черными ромбами, а станций эксперимента KISS – разноцветными треугольниками (а). Периоды работы станций – (б). Цветом показано разное техническое оснащение станций: Trillium Compact с периодом до 120 с (красный); Guralp CMG-6T и Guralp-CNG-6TD с периодом 30 с (синий); SME-4111 с периодом 30 с (голубой); Mark L-4C-3D с номинальным периодом 1 с, который может быть увеличен до 20 с (зеленый).

могут потенциально представлять серьезную вулканическую опасность.

Вулканы Ключевской группы известны своей очень насыщенной и разнообразной сейсмической деятельностью, которой посвящено много научных публикаций ученых сейсмологов (например, [Токарев, 1976; 1981; Зобин, 1979; Гордеев и др., 1986; Горельчик и др., 1988; Сенюков, 2006; 2013; Иванов, 2011; Senyukov et al., 2015; и др.]). Также в последние годы начали активно изучать эпизоды треморов [например, Droznin et al., 2015; Gomez-Garcia et al., 2018; Soubestre et al., 2018; 2019; Journeau et al., 2022] и многочисленные рои длиннопериодных и вулканотектонических землетрясений [Shapiro et al., 2017b; Galina et al., 2020; Melnik et al., 2020].

Одной из важнейших задач для понимания деятельности всей КГВ является изучение глубинного строения магматической питающей системы. В XX веке первые сведения о существовании магматического очага под вулканом Ключевской опубликованы член-корреспондентом АН СССР Г.С. Горшковым, обнаружившим его мантийные корни по данным об экранировании поперечных волн [Горшков, 1956]. В дальнейшем для решения этой задачи проводились исследования различными геофизическими методами: использовалась методика “просвечивания

магматических очагов” [Балеста, 1971; 1981]; глубинное сейсмическое зондирование [Аносов и др., 1978; Балеста и др., 1991]; детальная гравиметрическая съемка на Ключевском вулкане [Зубин и др., 1990]; корреляционный метод преломленных волн [Балеста и др., 1991; Пийп и др., 1991]; магнитотеллурическое зондирование [Мороз, 1991]. В работах академика С.А. Федотова с соавторами [Федотов, 1991; Федотов и др., 2010] на основе пространственного распределения очагов землетрясений получены данные о расположении источников магматического вещества под КГВ и представлена геофизическая модель питания.

Качественно новый этап по изучению скоростного строения среды в районе КГВ начался в 1996 г., когда Камчатский филиал (КФ) ФИЦ ЕГС РАН перешел на цифровую регистрацию сейсмических данных и обработку землетрясений на компьютерах [Гордеев и др., 2006; Чебров и др., 2013]. Непрерывная регистрация в течение более двух десятилетий обеспечила информацией о миллионах времен вступления волн *P* и *S* от сотен тысяч землетрясений в районе полуострова Камчатка. Эта информация была использована в ряде томографических исследований, которые в основном выявили структуры земной коры в районе Ключевского вулкана, где

расположена наиболее плотная сеть постоянных станций [Степанова, 2004; Гонтовая и др., 2004; Низкоус, 2005; Lees et al., 2007; Koulakov et al., 2011; 2017]. Следующие результаты в изучении скоростного строения КГВ были получены по данным временных сейсмических станций, которые устанавливались в районе вулканов Плоский Толбачик и Большая Удина [Koulakov et al., 2019]. Но в этой иерархии разномасштабных томографических моделей одним из самых слабых элементов оставалась структура мантийного клина под КГВ. Чтобы закрыть этот пробел был проведен масштабный эксперимент под названием KISS, который стартовал летом 2015 г. с целью покрытия всей площади КГВ большим количеством станций, работающих одновременно в течение одного года [Shapiro et al., 2015; 2017a]. Для решения поставленных задач по установке сети станций, сбору и обработке данных, получению новых моделей среды был создан международный консорциум, включающий ученых из разных научных организаций России, Франции и Германии. Предлагаемая работа освещает особенности обработки непрерывных сейсмических записей и отдельных землетрясений по станциям временной сети. Обработка данных, в основном, выполнялась в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН (г. Петропавловск-Камчатский, Россия), а также в лаборатории сейсмической томографии ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) (г. Новосибирск, Россия). Снятие времен вступления и лоцирование сейсмических событий по данным сетей KISS и KAGSR другими группами исследователей не проводилось.

На основе данных эксперимента KISS к настоящему времени был получен и опубликован ряд научных результатов. Томография на основе кросс-корреляции сейсмического шума [Егорушкин и др., 2020; Green et al., 2020] позволила получить более детальную информацию о приповерхностной части земной коры в районе КГВ и об окружающих ее осадочных бассейнах. Новые структурные модели строения глубинных частей коры и верхней мантии получены на основе томографии объемных сейсмических волн по объединенным данным KISS+KAGSR [Koulakov et al., 2020; Gordeev et al., 2020a; 2020b; Koulakov, 2022]. Также были проведены детальные изучения сейсмических треморов, генерируемых на разных глубинах (от границы корамантия до поверхности) питающей магматической системы [Journeau et al., 2022], и изменения

скоростей сейсмических волн под вулканами [Makus et al., 2023].

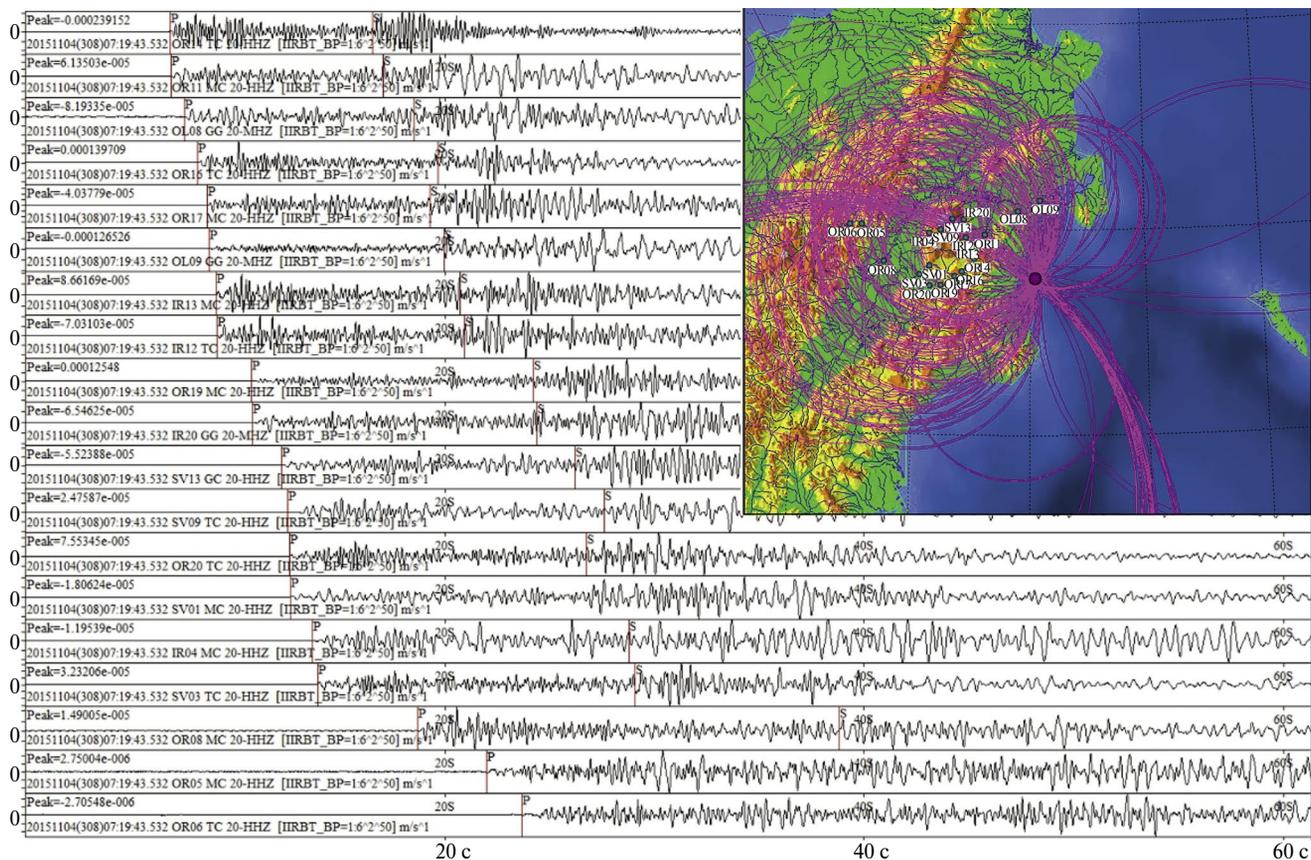
Целью данной работы является публикация каталогов и станционных бюллетеней с временами вступлений *P*- и *S*-волн по данным станций сетей KISS и KAGSR в открытом доступе для дальнейших научных исследований. Следующей важной задачей эксперимента KISS было получить представление, насколько сильно отличаются результаты лоцирования очагов землетрясений только по постоянным станциям КФ ФИЦ ЕГС РАН от результатов по гораздо более плотной комбинированной сети (KISS+KAGSR). Не будем забывать, что все основные выводы о современной и будущей активности вулканов делаются только по данным постоянных станций в режиме реального времени.

## СЕТЬ СТАНЦИЙ

В 2015–2016 гг. сеть постоянно действующих сейсмических станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (KAGSR) состояла из 78 станций. Из них в районе Северной группы вулканов был расположен 21 пункт регистрации сейсмических сигналов, 16 из которых были оснащены короткопериодными приборами и 5 – широкополосными, рис. 1. Подробные сведения о станциях можно найти в статьях [Чебров и др., 2017; 2018]. Результаты обработки региональных и вулканических землетрясений опубликованы в работах [Чебров и др., 2017; 2018; Сеньюков и др., 2017]. Летом 2015 г. в рамках проекта KISS было дополнительно установлено 77 временных станций. В итоге сейсмическая сеть покрыла площадь размером 150 на 150 км с шагом примерно 10–15 км. Информация о расположении, аппаратном оснащении и продолжительности работы станций представлена на рис. 1. Более подробные сведения о проекте KISS даны в работах [Shapiro et al., 2017a; Green et al., 2020; Koulakov et al., 2020]. Волновые формы доступны на сайте данных GEOFON: <https://geofon.gfz-potsdam.de/> под кодом X9.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ

За основу были взяты окончательный каталог и станционные бюллетени КФ ФИЦ ЕГС РАН, которые составляются в оперативном режиме с задержкой обработки не более суток. Из каталога были выбраны землетрясения, представляющие интерес для последующих томографических исследований. Далее данные первичной обработки по станциям сети KAGSR



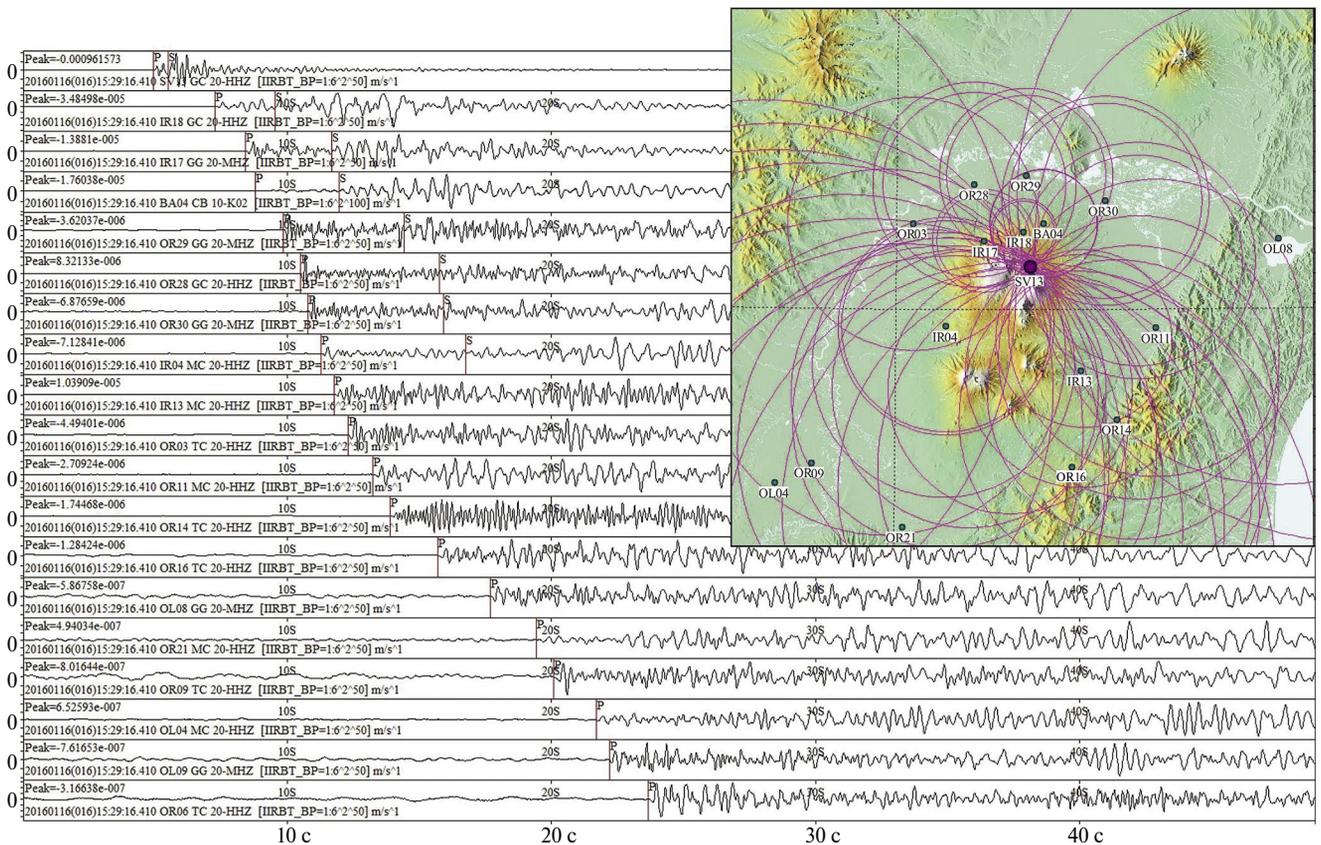
**Рис. 2.** Пример записи тектонического землетрясения 04.11.2015 г. в 07<sup>h</sup> 19<sup>m</sup> в Камчатском заливе на глубине ~40 км на нескольких станциях KISS (вертикальные компоненты). На записях отмечены вступления *P*- и *S*-волн в процессе обработки в программе DIMAS. Надо отметить, что вступления *S*-волн отмечаются на горизонтальных каналах, которые здесь не представлены. На врезке показана карта с эпицентром и станциями, записи которых представлены на этом рисунке.

дополнялись информацией со станций KISS. Обработка сигналов сейсмических станций, расчет параметров гипоцентров и энергетических характеристик землетрясений проводились в программе DIMAS [Дроздин, Дроздина, 2010]. При расчете гипоцентров тектонических землетрясений используется табличный годограф *P*- и *S*-волн. Для глубин гипоцентров  $h < 200$  км и эпицентральных расстояний  $\Delta < 500$  км годограф основан на региональной модели среды [Кузин, 1974], вне этой области использовался годограф Джеффриса–Буллена [Jeffreys, Bullen, 1940]. При обработке вулканических землетрясений Северной группы вулканов используется локальный годограф [Сенюков, 2006]. На рис. 2 приведен пример записи тектонического землетрясения, а на рис. 3 – вулканического землетрясения на станциях временной сети KISS и карты с их эпицентрами. Кроме стандартной обработки, был проведен дополнительный анализ непрерывных данных эксперимента KISS. В рамках этого анализа созданы алгоритм

и программное обеспечение для выделения событий, которые не были лоцированы по данным постоянной сети KAGSR.

Алгоритм выделения пропущенных событий реализован в несколько этапов:

- 1). Полосовая фильтрация вертикальных каналов суточных записей с диапазоном пропуска 1–10 Гц.
- 2). Выделение сейсмических событий с помощью *STA/LTA* детектора [Allen, 1982] с параметрами  $STAlength = 1 c$ ,  $LTAlength = 60 c$ ,  $Threshould = 8$ ,  $MinDuration = 3 c$ ,  $LTAhold = On\ during\ event$ . В итоге зафиксировано 754 025 срабатываний по всем станциям эксперимента KISS.
- 3). Группирование срабатываний для выделения волновых форм потенциального события, необходимых для дальнейшего детального анализа, проводилось по следующему принципу: поиск как минимум 6 срабатываний на различных станциях, парная разница времен срабатываний на которых по абсолютной величине меньше величины



**Рис. 3.** Пример записи вулканического землетрясения 16.01.2016 г. в 15<sup>h</sup> 29<sup>m</sup> в постройке Ключевского вулкана на глубине  $\sim (-1)$  км на нескольких станциях KISS (вертикальные компоненты). На записях отмечены вступления  $P$ - и  $S$ -волн в процессе обработки в программе DIMAS. Надо отметить, что вступления  $S$ -волн отмечаются на горизонтальных каналах, которые здесь не представлены. На врезке показана карта с эпицентром и станциями, записи которых представлены на этом рисунке.

пробега продольной волны между соответствующей парой станций. При этом предполагалось, что разница времен прихода продольных волн от произвольного гипоцентра на двух станциях по абсолютной величине, как правило, меньше времени пробега между этими станциями. В результате было выделено 6374 события.

4). Привязка выделенных волновых форм к известным событиям, содержащимся в каталоге Камчатского филиала (12986 тектонических и вулканических землетрясений) и каталоге NEIC с  $M > 5$  (1528 событий, лоцированных за пределами зоны ответственности Камчатского филиала) осуществлялась, если для одного из детектированных вступлений, абсолютная разница (время детектирования вступления – (время в очаге + время пробега продольной волны из годографа IASP91)) меньше 10 с. Критерий 10 с был взят из соображений, что он должен быть достаточно большой, чтобы перекрыть невязки теоретических и наблюдаемых времен вступлений и достаточно малым, чтобы уменьшить вероятность существования двух

событий на данном интервале. Для известных землетрясений из каталога КФ, использовалось время пробега продольной волны из регионального или вулканического годографа. Волновые формы, отождествленные с событиями вне зоны ответственности Камчатского филиала, далее не рассматривались. После перечисленных операций осталось 2526 потенциальных событий.

В пределах отведенного времени для обработки записей эксперимента KISS, сотрудниками была проанализирована большая часть волновых форм автоматически выделенных потенциальных событий. В основном это слабые вулканические и тектонические землетрясения, для обработки которых было не достаточно данных постоянной сети КФ. Кроме этого встречались вулканические события в постройках вулканов без четких вступлений объемных волн, вторичные фазы от далеких землетрясений и помехи. В результате анализа в каталог добавлено 560 землетрясений, обработка которых только по сети KAGSR была невозможна.

КАТАЛОГ

В итоге финальный каталог содержит основные параметры для 2136 землетрясений. Из них 1326 региональных землетрясений, в основном из зоны субдукции, и 810 локальных вулканических событий, в том числе 560 вновь обработанных землетрясений. На рис. 4 представлены карты эпицентров тектонических и вулканических землетрясений и проекции гипоцентров на вертикальный разрез. Гистограммы распределения этих землетрясений в зависимости от энергетического класса  $K_s$  приведены на рис. 5. Каталог в формате “xlsx”, станционный бюллетень в формате “isf” с пояснениями и файл со станционными данными

опубликованы в дополнительных материалах к предлагаемой статье [ESM\_1.xlsx, ESM\_2.isf, ESM\_3.txt]<sup>a</sup>.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ С ОПЕРАТИВНЫМИ ОЦЕНКАМИ ПО ПОСТОЯННОЙ СЕТИ

Проведен анализ совместных решений из каталогов, полученных только по данным станций постоянной сети KAGSR и более плотной сейсмической сети, включающей станции проекта KISS и станции KAGSR. Сравнение результатов проводилось отдельно для вулканических и региональных землетрясений. Везде использована разница параметров каталога по постоянной

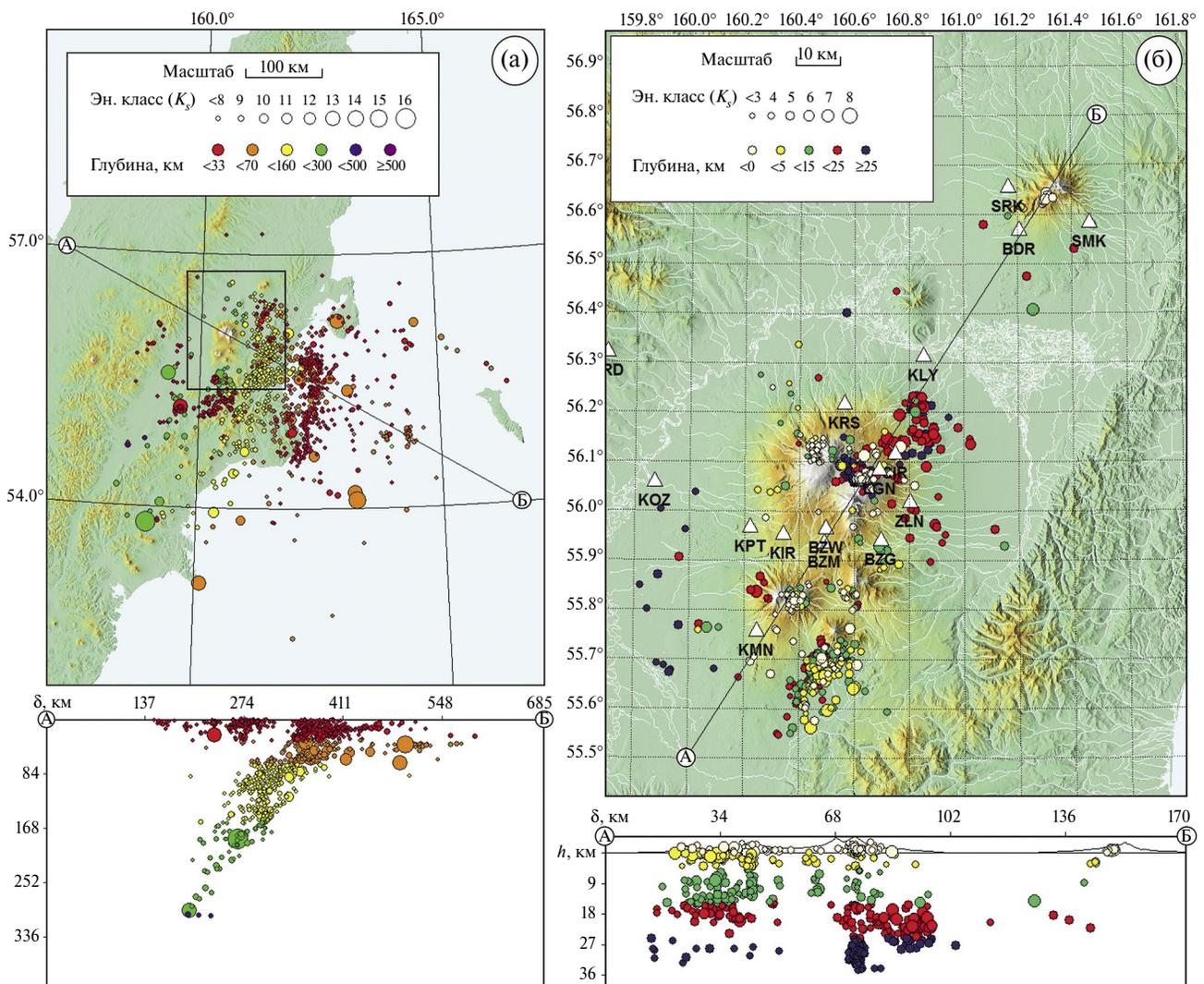
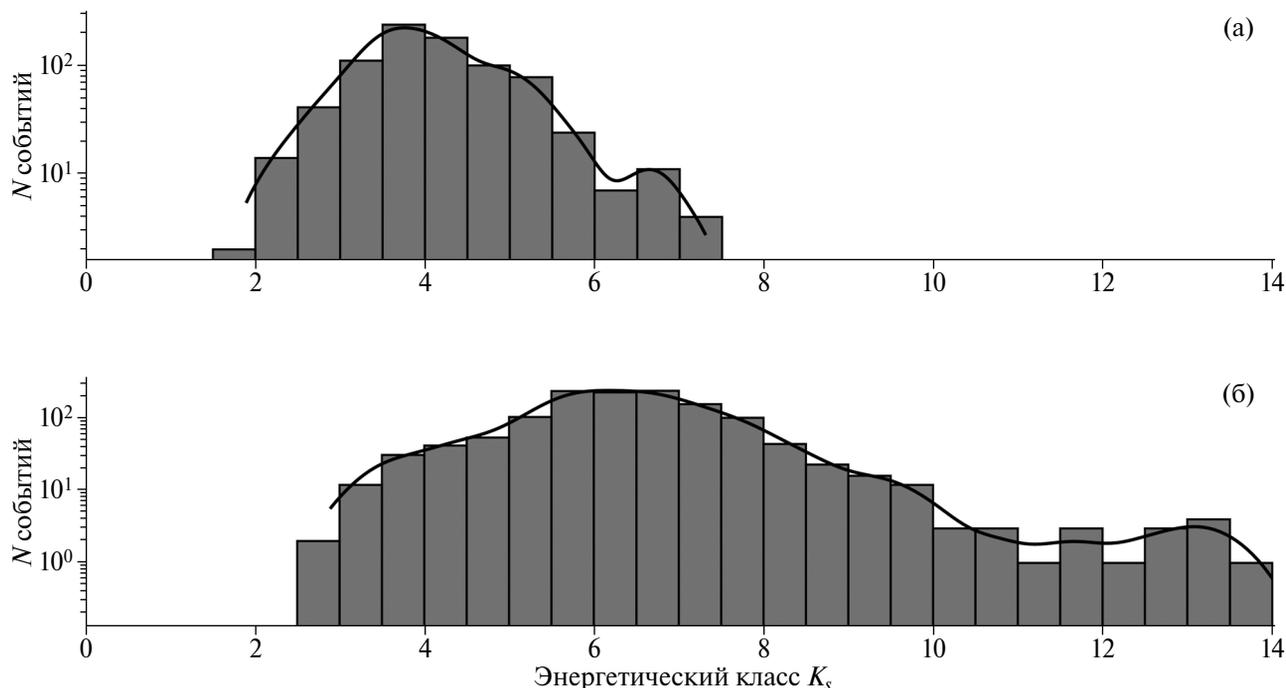


Рис. 4. Карты эпицентров землетрясений, обработанных по сети станций KAGSR+KISS с проекциями гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–Б: (а) – карта и ниже разрез для тектонических землетрясений; (б) – карта и ниже разрез для локальных вулканических землетрясений (район выделен на карте (а)).



**Рис. 5.** Гистограммы распределения землетрясений из каталога по данным сети станций KAGSR+KISS в зависимости от энергетического класса  $K_s$ : (а) — вулканические землетрясения; (б) — региональные землетрясения. Черная линия — результат аппроксимации методом оценки формы распределения с помощью ядра Гаусса.

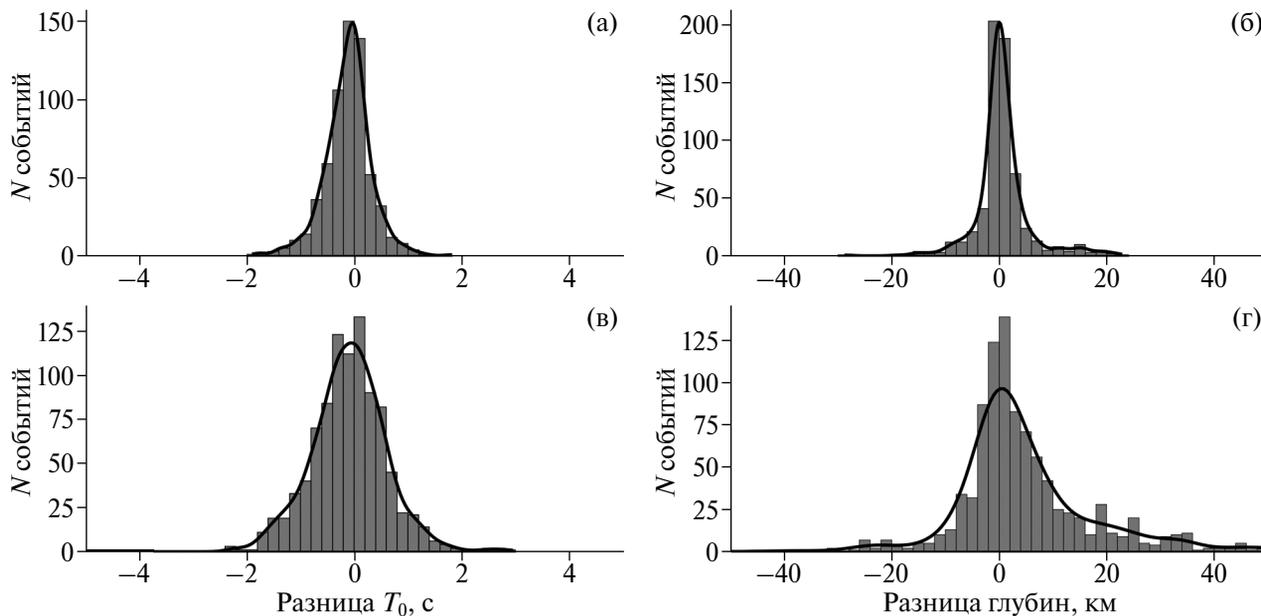
сети минус каталог по объединенной сети. Главная задача состояла в оценке ошибки определения по постоянной сети в предположении, что определения параметров по совместной сети более точные. На рис. 6–рис. 15 приведены распределения разности параметров землетрясений, определенных по данным постоянной и объединенной сейсмическим сетям в виде гистограмм и/или сглаженных контуров, полученных методом оценки формы распределения с помощью ядра Гаусса [Scott, 1992; Silverman, 1986]. На двумерных графиках совместной плотности распределения значения цветной шкалы снизу вверх соответствуют уровням попадания отображаемых величин во внутреннюю область от 90% до 10% с шагом 10%. По приведенным материалам можно оценить точность определения параметров землетрясений по постоянно действующей сети сейсмических станций Камчатского филиала.

В табл. 1 сведены средние систематические отклонения параметров землетрясений, определенных по данным станций сети KAGSR и станций KAGSR+KISS, и их стандартное отклонение.

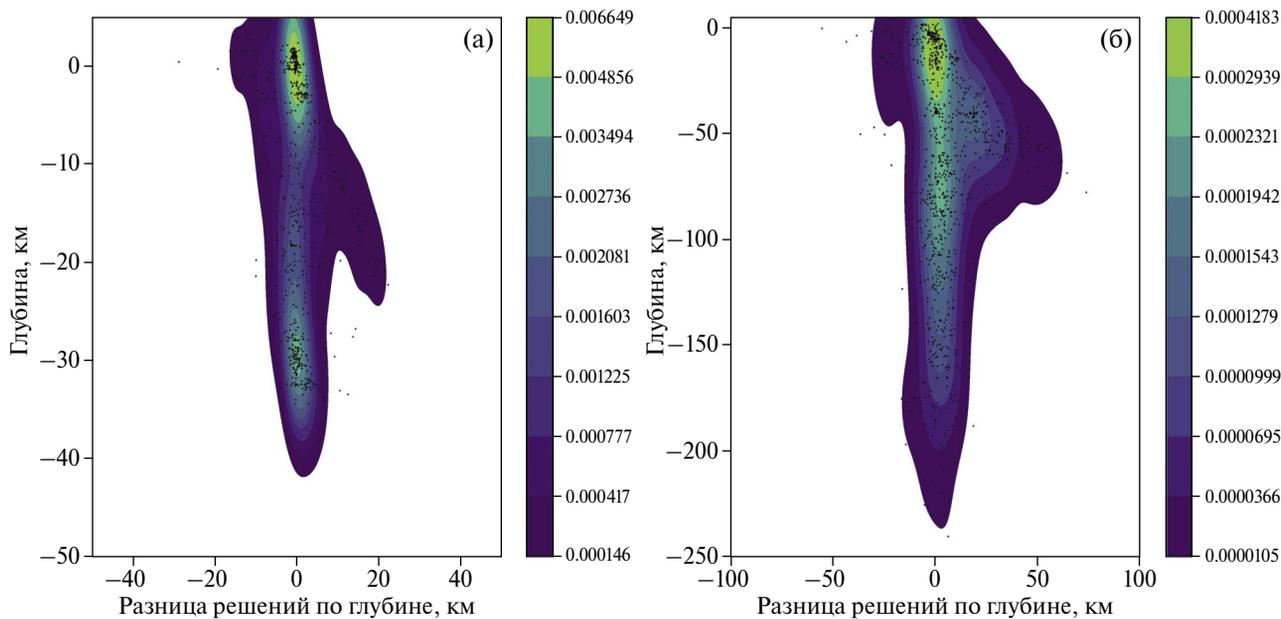
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

КГВ является одним из самых больших и активных вулканических кластеров в мире, который расположен в восточной части России на полуострове Камчатка, вблизи места стыка северной оконечности Курило-Камчатской зоны субдукции, западной части Алеутской дуги и северо-западного сегмента Гавайско-Императорской цепи подводных гор. Для детального изучения КГВ летом 2015 г. на период времени протяженностью один год была установлена сеть временных сейсмических станций KISS в рамках международного сотрудничества ученых из разных научных организаций России, Франции и Германии. Одной из важных задач проекта было получение каталога зарегистрированных землетрясений и станционного бюллетеня с временами вступлений  $P$ - и  $S$ -волн для построения новых томографических моделей среды под КГВ.

Полученный в результате обработки итоговый каталог включает 2136 событий. Из них 1326 региональных землетрясений, в основном, из зоны субдукции, и 810 локальных вулканических событий, в том числе 560 вновь обработанных



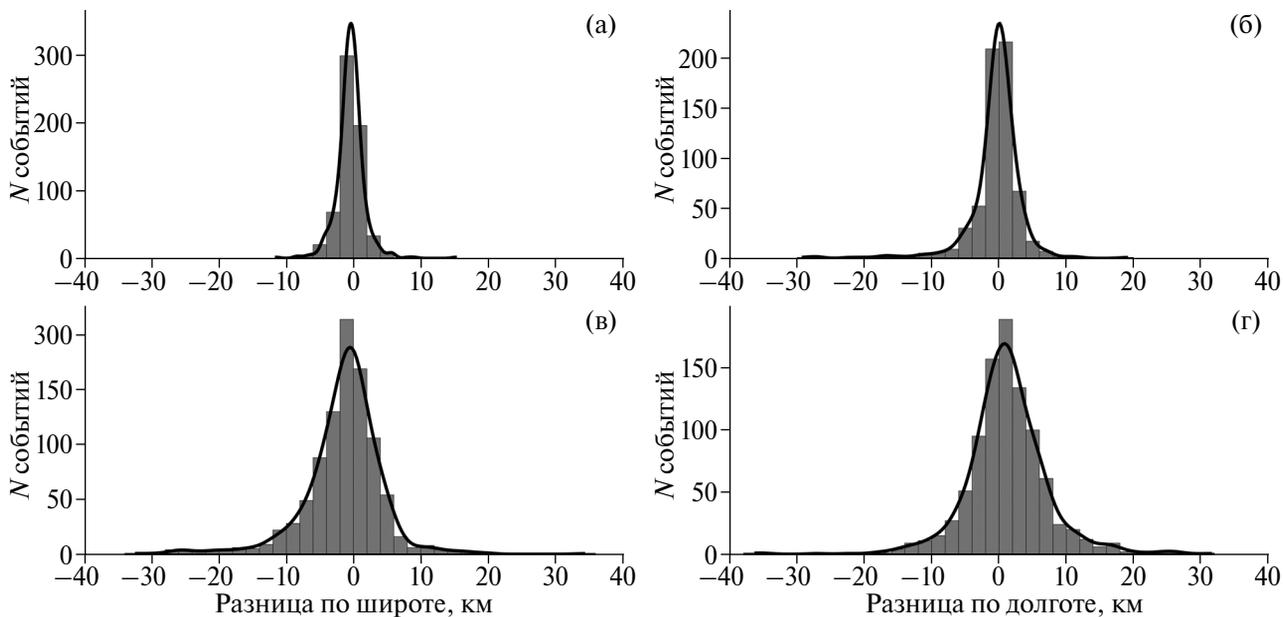
**Рис. 6.** Гистограммы распределения разности параметров землетрясений, определенных по станциям сети KAGSR и станциям KAGSR+KISS. Разница значений времени в очаге  $T_0$ : (а) – для вулканических землетрясений; (в) – для региональных землетрясений. Разница глубин: (б) – для вулканических землетрясений; (г) – для региональных землетрясений. Черная линия – результат аппроксимации методом оценки формы распределения с помощью ядра Гаусса.



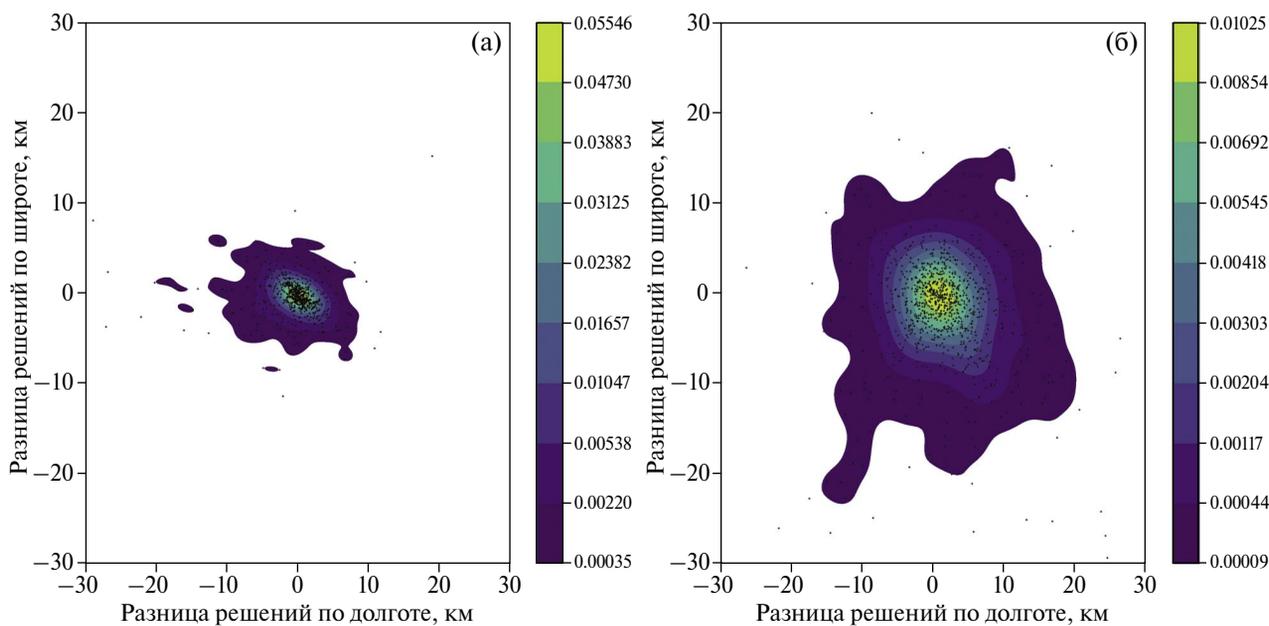
**Рис. 7.** Совместная плотность распределения разности оценок по глубине: (а) – для вулканических землетрясений; (б) – для региональных землетрясений.

землетрясений. Каталог в формате “xlsx”, станционный бюллетень в формате “isf” с пояснениями и файл со станционными данными опубликованы в дополнительных материалах к предлагаемой статье [ESM\_1.xlsx, ESM\_2.isf, ESM\_3.txt].

В результате сравнительного анализа двух каталогов были построены распределения разности параметров землетрясений, определенных по станциям сети KAGSR и станциям гораздо более плотной сети KAGSR+KISS.



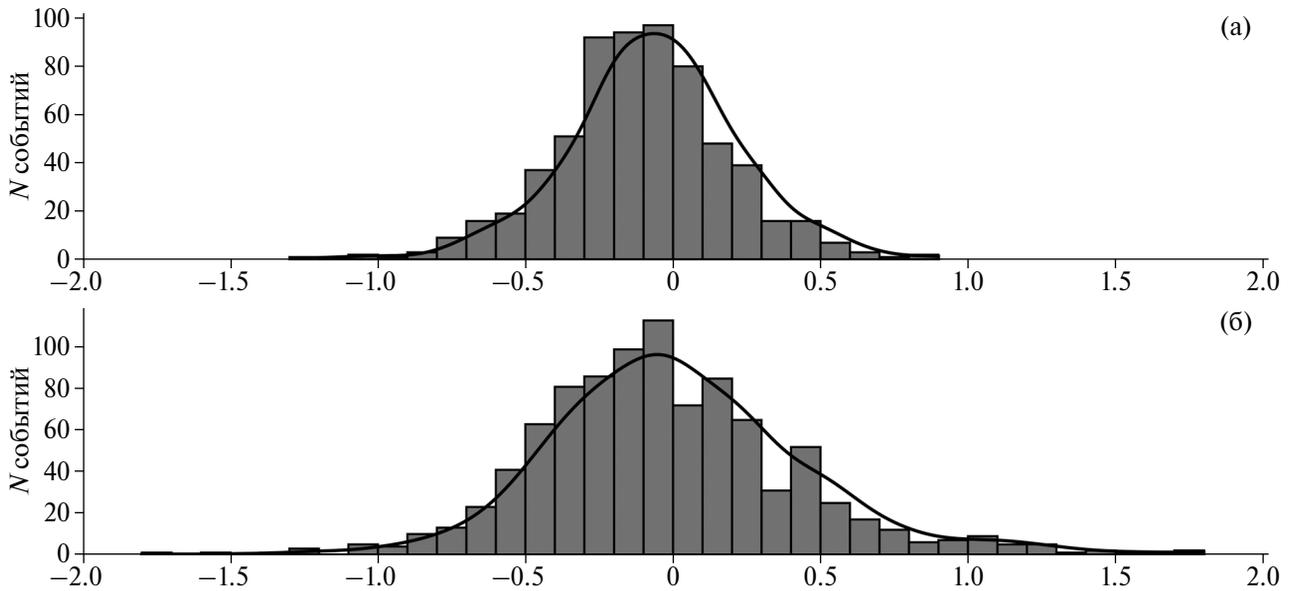
**Рис. 8.** Гистограммы распределения разности параметров землетрясений, определенных по станциям сети KAGSR и станциям KAGSR+KISS. Разница значений по широте: (а) – для вулканических землетрясений; (в) – для региональных землетрясений. Разница значений по долготе: (б) – для вулканических землетрясений; (г) – для региональных землетрясений. Черная линия – результат аппроксимации методом оценки формы распределения с помощью ядра Гаусса.



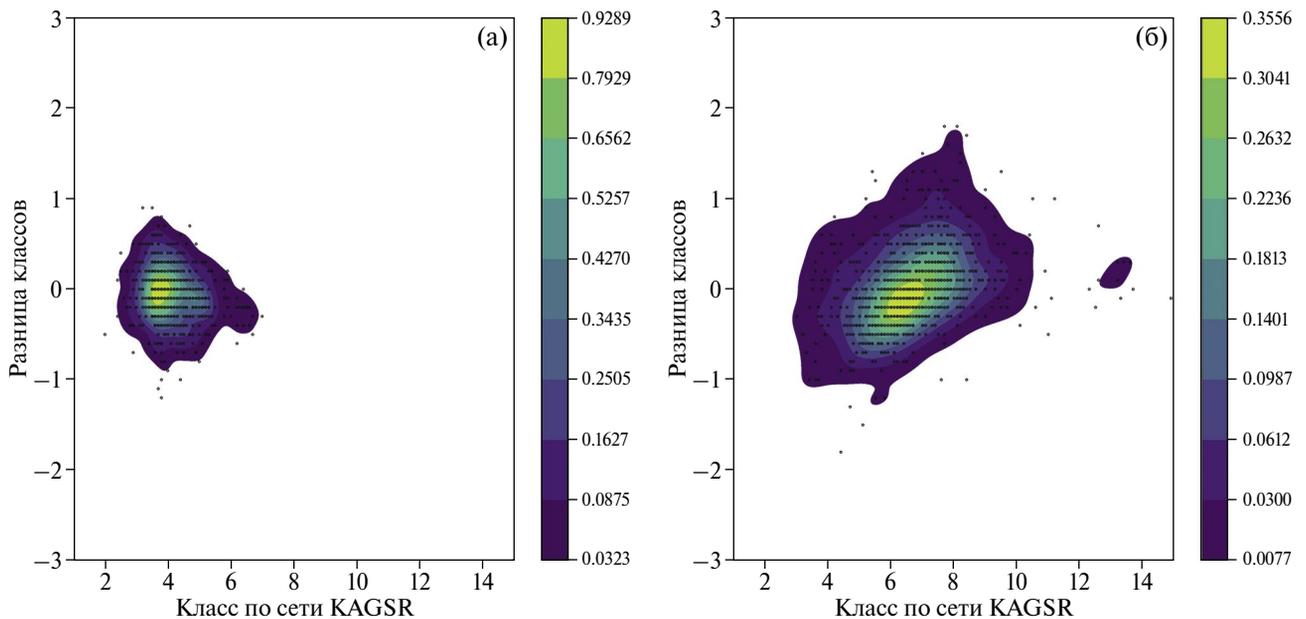
**Рис. 9.** Совместная плотность распределения разности оценок координат в плане: (а) – для вулканических землетрясений; (б) – для региональных землетрясений.

Детальная сеть станций, развернутая во время эксперимента KISS, позволила оценить ошибки в определении параметров землетрясений постоянной сетью Камчатского филиала, используемых при оперативном мониторинге

сейсмической и вулканической активности. Несмотря на полученные оптимистические среднеквадратичные отклонения, наблюдается значительная разница в результатах при регистрации землетрясений малым количеством



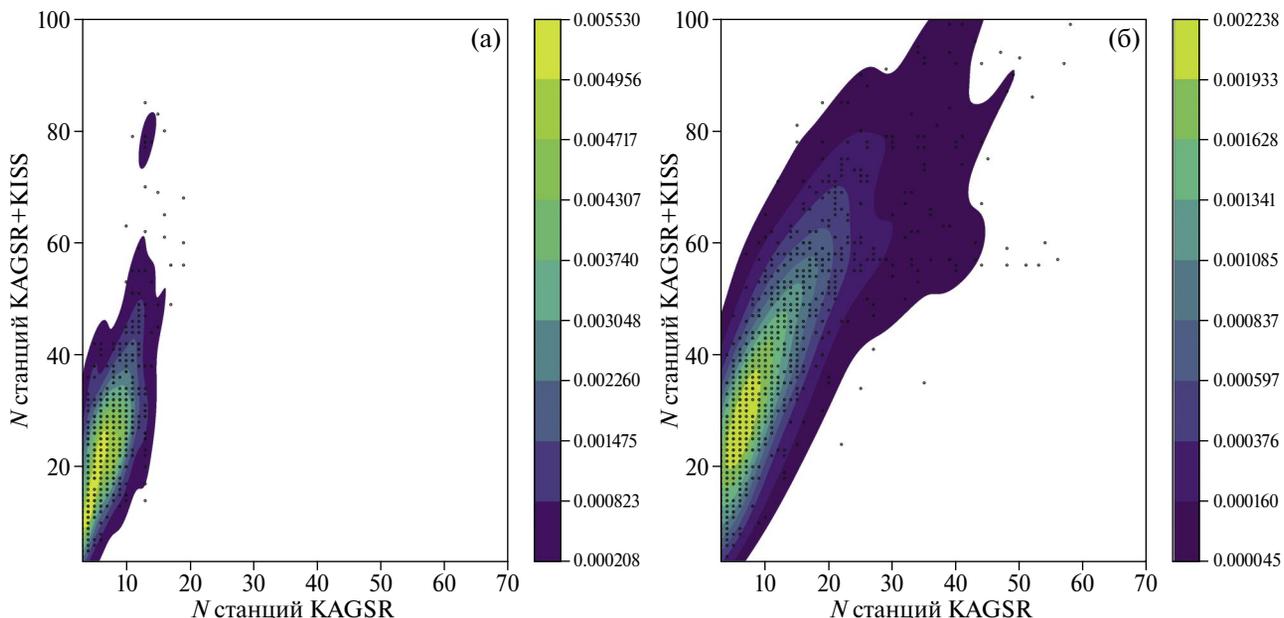
**Рис. 10.** Гистограммы распределения разности оценок по энергетическим классам: (а) – для вулканических землетрясений; (б) – для региональных землетрясений. Черная линия – результат аппроксимации методом оценки формы распределения с помощью ядра Гаусса.



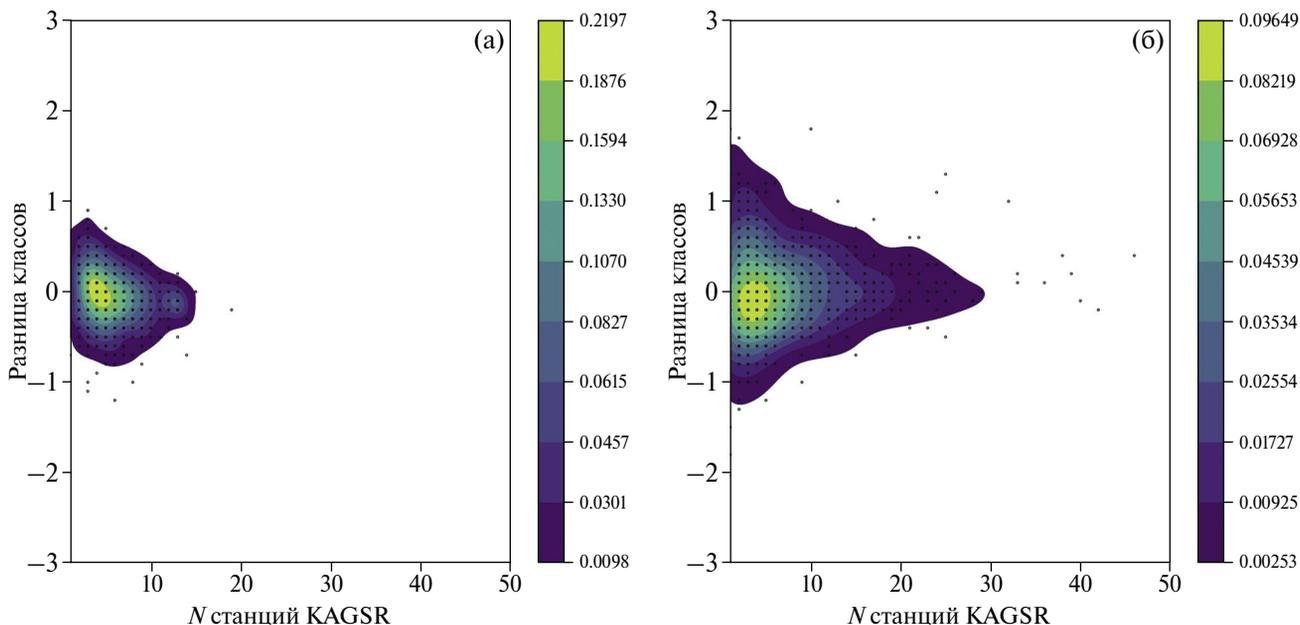
**Рис. 11.** Совместная плотность распределения по разнице оценок классов и класса по сети KAGSR: (а) – для вулканических землетрясений; (б) – для региональных землетрясений.

станций: для вулканических событий от 5 до 25 км по расстоянию и до 0.8 по энергетическому классу; для региональных – до 60 км по расстоянию и до 1.5 по энергетическому классу. По причине использования в расчетах упрощенных годографов, а для региональных землетрясений одностороннего расположения сети сейсмических станций по отношению

к фокальной зоне, реальные ошибки могут оказаться еще больше. В случае сейсмической активизации, регистрируемой малым количеством станций, это обстоятельство следует учитывать при составлении экспертных заключений о текущей сейсмической обстановке. Использование трехмерной модели среды, полученной разными группами исследователей



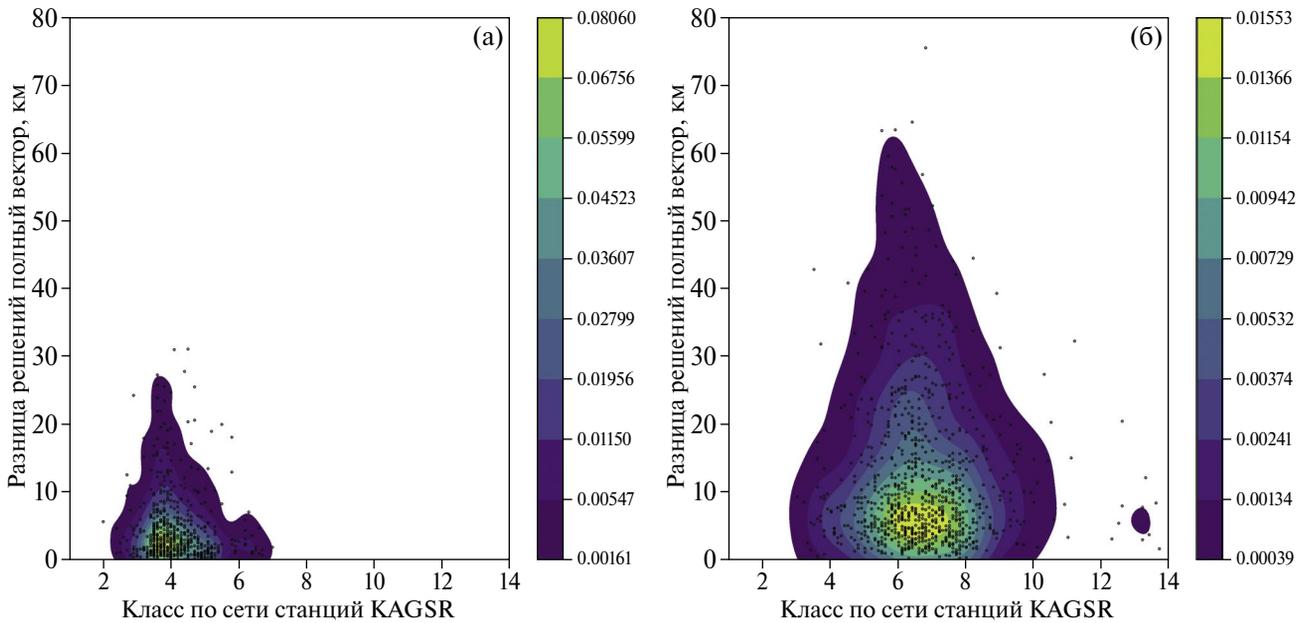
**Рис. 12.** Совместная плотность распределения по числу станций участвующих в обработке: (а) – для вулканических землетрясений; (б) – для региональных землетрясений.



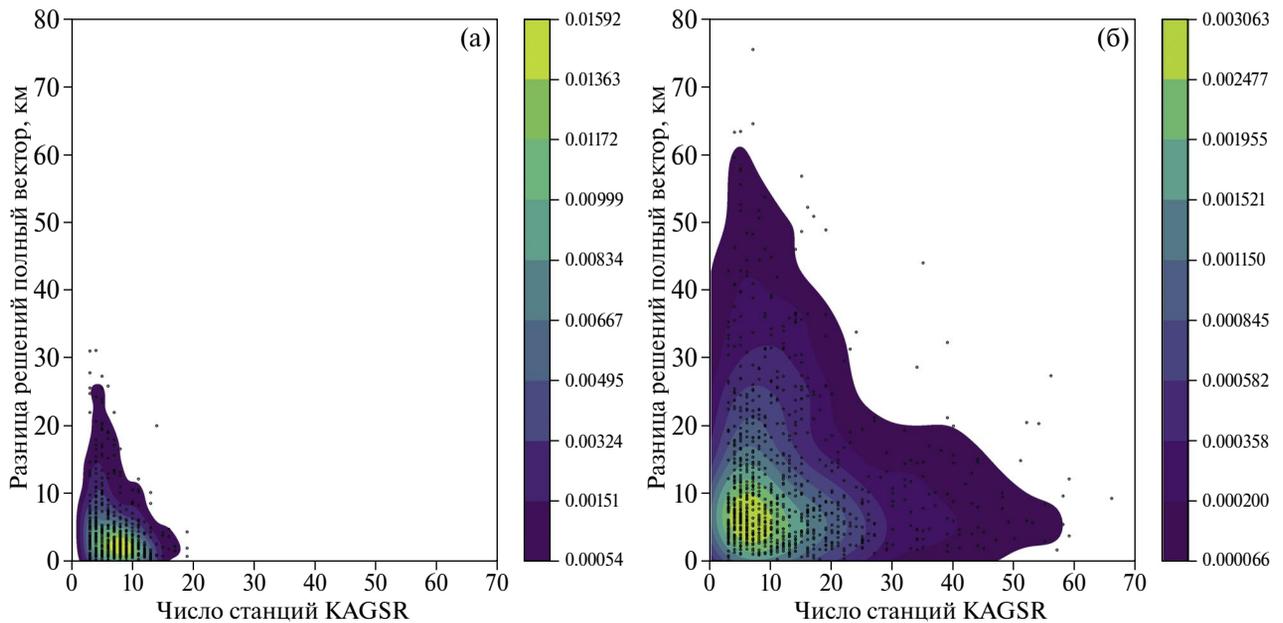
**Рис. 13.** Совместная плотность распределения по разнице энергетических классов и количества станций сети KAGSR, участвующих в обработке землетрясений: (а) – для вулканических землетрясений; (б) – для региональных землетрясений.

в результате эксперимента KISS, без увеличения числа постоянно действующих сейсмических станций, по-видимому, не устранит проблему ошибок в определении параметров гипоцентров из-за нелинейности задачи и неоднозначности получаемых решений.

Первые результаты по построению томографической модели КГВ с использованием полученных на начальном этапе обработки данных времен вступления по 1122 землетрясениям из представленного в работе каталога опубликованы в работе [Koulakov et al., 2020].



**Рис. 14.** Совместная плотность распределения полного вектора разницы оценок гипоцентров и энергетического класса по сети KAGSR.



**Рис. 15.** Совместная плотность распределения полного вектора разницы оценок гипоцентров и количества станций сети KAGSR, участвующих в определении параметров землетрясений.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки № 14. W03.31.0033 “Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем

Востоке РФ”. А так же при поддержке Мин-обнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического

Таблица 1

	Вулканические землетрясения		Региональные землетрясения	
	Среднее систематическое отклонение	Стандартное отклонение	Среднее систематическое отклонение	Стандартное отклонение
Разница по широте (км)	0.45	2.04	-1.48	5.89
Разница по долготе (км)	0.48	3.96	1.2	6.12
Разница по глубине (км)	0.61	5.00	5.05	13.45
Разница времени в очаге (с)	0.11	0.43	-0.09	0.72
Разница по классам	-0.06	0.29	0.02	0.44

мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rg.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аносов Г.И., Бикенина С.К., Попов А.А. и др.* Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: 1978. 130 с.
- Балеста С.Т.* Методика “просвечивания” глубинных частей вулканических аппаратов сейсмическими волнами. Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука. 1971. С. 98–101.
- Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука. 1981. 134 с.
- Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев В.А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л.* Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Кожемяка Н.Н.* Основные этапы формирования рельефа Камчатки // Геоморфология. 1970. № 3. С. 24–31.
- Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л.* Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
- Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Симицын В.И., Чебров В.Н.* Вулканическое дрожание Ключевского вулкана (извержение вершинного кратера в 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 39–53.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6–27.
- Горельчик В.И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки в 1971–1983 гг // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 90–100.
- Горшков Г.С.* О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703–705.
- Действующие вулканы Камчатки / С.А. Федотов и Ю.П. Масуренков (отв. ред.).* М.: Наука. 1991. Т. 1. 302 с.
- Дроздин Д.В., Дроздина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов “DIMAS” // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Егорушкин И.И., Кулаков И.Ю., Шаниро Н.М., Гордеев Е.И., Яковлев А.В., Абкадыров И.Ф.* Структура верхней коры под вулканами Ключевской группы по данным шумовой томографии // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 1. С. 85–102. DOI: 10.15372/GiG2020184.
- Зобин В.М.* Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука. 1979. 92 с.
- Зубин М.И., Козырев А.И., Лучицкий А.И.* Гравитационная модель строения Ключевского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 76–93.
- Иванов В.В.* Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 2011. 12 с.
- Кузин И.П.* Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука. 1974. 145 с.
- Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука. 1991. 181 с.
- Низкоус И.В.* Томографическая реконструкция Камчатского региона с высоким пространственным разрешением. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М. 2005. 24 с.
- Пийп В.Б., Ефимова Е.А., Гонтовая Л.И.* Интерпретация годографов сейсмических волн вдоль профиля КМПВ в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 83–91.
- Сеньюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Сеньюков С.Л.* Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.

- Сенюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. 2013. 144 с.
- Сенюков С.Л., Нужи́дина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2015 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2017. С. 88–94.
- Сенюков С.Л., Нужи́дина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2018. С. 88–95.
- Степанова М.Ю. Трехмерная скоростная структура коры и верхней мантии восточной Камчатки, полученная методами сейсмической томографии. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М. 2004. 24 с.
- Токарев П.И. Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439–442.
- Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука. 1981. 164 с.
- Федотов С.А. О механизме вулканической деятельности на Камчатке, Курило-Камчатской дуге и в сходных структурах // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука. 1991. С. 18–35.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
- Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Сенюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2015 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2017. С. 67–73.
- Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Сенюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2018. С. 65–72.
- Allen R. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects // Bull. Seismol. Soc. Am. 1982. V. 72 (6B). P. 225–242. <https://doi.org/10.1785/BSSA07206B0225>
- Droznin D., Shapiro N., Droznina S. Y., Senyukov S., Chebrov V., Gordeev E. Detecting and locating volcanic tremors on the Klyuchevskoy group of volcanoes (Kamchatka) based on correlations of continuous seismic records // Geophysical Journal International. 2015. V. 203 (2). P. 1001–1010. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv342>
- Galina N.A., Shapiro N.M., Droznin D.V. et al. Recurrence of Deep Long-Period Earthquakes beneath the Klyuchevskoi Volcano Group, Kamchatka // Izv., Phys. Solid Earth. 2020. V. 56. P. 749–761. <https://doi.org/10.1134/S1069351320060026>
- Gómez-García C., Brenguier F., Boue P., Shapiro N., Droznin D., Droznina S. et al. Retrieving robust noise-based seismic velocity changes from sparse data sets: Synthetic tests and application to Klyuchevskoy volcanic group (Kamchatka) // Geophysical Journal International. 2018. V. 214. P. 1218–1236. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy190>
- Gordeev E.I., Koulakov I.Y., Shapiro N.M. The Magma Feeding System of the Klyuchevskaya Group of Volcanoes (Kamchatka) // Dokl. Earth Sc. 2020a. V. 493. P. 627–631. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20080085>
- Gordeev E.I., Koulakov I.Y., Shapiro N.M. Subduction in Kurile-Kamchatka and Aleutian junction // Dokl. Earth Sc. 2020b. V. 494. P. 790–794. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20100050>
- Green R.G., Sens-Schönfelder C., Shapiro N., Koulakov I., Tilmann F., Dreiling J. et al. Magmatic and sedimentary structure beneath the Klyuchevskoy Volcanic Group, Kamchatka, from ambient noise tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. e2019JB018900. <https://doi.org/10.1029/2019JB018900>
- Jeffreys H., Bullen K.E. Seismological Tables. London: British Association for the Advancement of Science. 1940.
- Journeau C., Shapiro N.M., Seydoux L., Soubestre J., Koulakov I.Y., Jakovlev A.V., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Droznin D.V., Sens-Schönfelder C., Luehr B.G., Tong F., Farge G., Jaupart C. Seismic tremor reveals active transcrustal magmatic system beneath Kamchatka volcanoes // Sci. Adv. 2022. V. 8. eabj1571. doi:10.1126/sciadv.abj1571
- Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Senyukov S., Jakovlev A. Feeding volcanoes of the Klyuchevskoy group from the results of local earthquake tomography // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L09305. doi:10.1029/2011GL046957
- Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E.I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R.I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. 122. P. 3852–3874. <https://doi.org/10.1002/2017JB014082>
- Koulakov I., Komzeleva V., Abkadyrov I., Kugaenko Y., El Khrepy S., Al Arifi N. Unrest of the Udina volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 379. P. 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.006>
- Koulakov I., Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Luehr B.G., Gordeev E.I., Jakovlev A. et al. (2020). Mantle and crustal sources of magmatic activity of Klyuchevskoy and surrounding volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. e2020JB020097. <https://doi.org/10.1029/2020JB020097>
- Koulakov I.Yu. Seismic Tomography of Kamchatkan Volcanoes // Russ. Geol. Geophys. 2022. V. 63 (11): P. 1207–1244. doi:<https://doi.org/10.2113/RGG20214380>
- Laverov N.P. Modern and Holocene volcanism in Russia. Moscow: Nauka. 2005.
- Lees J.M., Symons N., Chubarova O. et al. Tomographic Images of Klyuchevskoy Volcano P-Wave Velocity. Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region / J. Eichelberger et al. (eds.). Geophysical Monograph. Series 172. Washington: AGU. 2007. P. 293–302.

- Makus P., Sens-Schönfelder C., Illien L., Walter T.R., Yates A., Tilmann F.* Deciphering the whisper of volcanoes: Monitoring velocity changes at Kamchatka's Klyuchevskoy group with fluctuating noise fields // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023. V. 128. e2022JB025738. <https://doi.org/10.1029/2022JB025738>
- Melnik O., Lyakhovskiy V., Shapiro N.M., Galina N., Bergal-Kuvikas O.* Deep long period volcanic earthquakes generated by degassing of volatile-rich basaltic magmas // *Nature Communications*. 2020. V. 11. Article number: 3918. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17759-4>
- Ponomareva V.V., Churikova T.G., Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D.* Late Pleistocene-Holocene volcanism on the Kamchatka peninsula, Northwest Pacific region // *J. Eichelberger, P. Izbekov, N. Ruppert, J. Lees, E. Gordeev (eds.). Volcanism and subduction: The Kamchatka Region, AGU Geophysical Monograph Series*. 2007. V. 172. P. 165–198. <https://doi.org/10.1029/172GM15>
- Scott D.W.* Multivariate Density Estimation: Theory, Practice and Visualization. New York: John Wiley & Sons. 1992. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470316849>
- Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B.G., Weber M., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenko Y.A., Saltykov V.A.* Klyuchevskoy volcanic group experiment (KISS). 2015. GFZ Data Services. Other. Seismic Network. doi:10.14470/K47560642124
- Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B., Weber M., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenko Y., Saltykov V.* Understanding Kamchatka's Extraordinary Volcano Cluster // *EOS*. 2017a. DOI: 10.1029/2017eo071351
- Shapiro N.M., Droznin D.V., Droznina S.Ya., Senyukov S.L., Gusev A.A., Gordeev E.I.* Deep and shallow long-period volcanic seismicity linked by fluid-pressure transfer // *Nature Geosciences*. 2017b. V. 10. P. 442–445. doi:10.1038/ngeo2952
- Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Y., Garbuzova V.T., Kozhevnikova T.Y., Sobolevskaya O.V. et al.* Seismic monitoring of the Plosky Tolbachik eruption in 2012–2013 (Kamchatka Peninsula Russia) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 302. P. 117–159. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.06.018>
- Silverman B.W.* Density Estimation for Statistics and Data Analysis // *Monographs on Statistics and Applied Probability*. London: Chapman and Hall, 1986. <https://doi.org/10.1201/9781315140919>
- Soubestre J., Shapiro N.M., Seydoux L., de Rosny J., Droznin D.V., Droznina S.Y. et al.* Network-based detection and classification of seismovolcanic tremors: Example from the Klyuchevskoy volcanic group in Kamchatka // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. V. 123. P. 564–582. <https://doi.org/10.1002/2017JB014726>
- Soubestre J., Seydoux L., Shapiro N.M., de Rosny J., Droznin D.V., Droznina S.Y. et al.* Depth migration of seismovolcanic tremor sources below the Klyuchevskoy volcanic group (Kamchatka) determined from a network based analysis // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. P. 8018–8030. <https://doi.org/10.1029/2019GL083465>

## The KISS Network in 2015–2016: Catalogs and Comparison of the Processing Results with Operational Estimates from the Permanent Network

S. L. Senyukov<sup>a,c,\*</sup>, D. V. Droznin<sup>a,c</sup>, S. Ya. Droznina<sup>a</sup>, N. M. Shapiro<sup>b</sup>, and I. N. Nuzhdina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Kamchatka Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

<sup>b</sup>*Institut des Sciences de la Terre, Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble, 38400 France*

<sup>c</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

\*e-mail: ssl@emsd.ru

Received May 5, 2023

revised September 3, 2023

accepted September 3, 2023

**Abstract** – As part of the international collaboration of several research groups from Russia, France, and Germany, 77 temporary seismic stations were installed in the summer of 2015 for one-year period to conduct a detailed study of the deep structure of the Earth's crust and upper mantle in the region of the Klyuchevskoi Volcano Group (KGV) in the Kamchatka Peninsula. One of the results of the KISS experiment (Klyuchevskoi Investigation – Seismic Structure of an extraordinary volcanic system) was the final catalog of the joint data from the temporary stations and the permanent network of the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS). The catalog comprises 2136 events, including 560 for which the permanent network catalog lacked sufficient data for correct processing. The catalog in .xlsx format and the station bulletin in .isf format are presented in the supplementary material to the paper. A comparative analysis was conducted on the joint solutions of two catalogs: one obtained solely from the data of the KB GS RAS permanent network stations and another from a denser seismic network integrated with KISS stations.

**Keywords:** temporary seismic network, seismic sounding, seismic monitoring, earthquake catalog