

**РЕГИОНАЛЬНЫЙ КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ 1962–2010 гг.:**

*технология и методика создания*

**В.Н. Чебров<sup>1</sup>, В.И. Левина<sup>2</sup>, А.В. Ландер<sup>3</sup>, А.Ю. Чеброва<sup>1</sup>, С.Л. Сеньюков<sup>1</sup>, Д.В. Дрознин<sup>1</sup>, С.Я. Дрознина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, [ayuch@emsd.ru](mailto:ayuch@emsd.ru)

<sup>2</sup>Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, [vlr.levina@gmail.com](mailto:vlr.levina@gmail.com)

<sup>3</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, [land@mitp.ru](mailto:land@mitp.ru)

Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов берет свое начало в 1961–1962 гг., когда на полуострове были начаты детальные сейсмологические наблюдения силами сотрудников Тихоокеанской сейсмологической экспедиции (ТСЭ), возглавляемой С.А. Федотовым, и Камчатской геолого-геофизической обсерватории (КГГО), а затем Институтом вулканологии. В начале 1962 г. в регионе было всего пять сейсмических станций, в конце года их было уже десять [1], а к 2010 г. сеть насчитывала 64 сейсмические станции. Подробное описание состояния сети, параметры аппаратуры можно найти в [2, 3].

За время почти 50-летней истории каталога аналоговые высокочастотные приборы сменились цифровыми широкополосными, произошел переход от ручной обработки бумажных сейсмограмм к работе с цифровыми записями на компьютере, полностью поменялись методики сбора, обработки и хранения сейсмологической информации. Все изменения, так или иначе связанные с процессом формирования каталога, отражались на его характеристиках. К сожалению, каталог не сопровождался описанием, характеризующим качество, непосредственно связанное с особенностями его формирования. В [4] предпринята попытка систематизации особенностей и истории создания регионального каталога Камчатки и Командорских островов. В настоящей статье остановимся только на основных этапах этого процесса.

**Технология создания каталога** в 1962–2009 гг. была двухступенчатой: выпускались оперативный и окончательный каталоги землетрясений. В эпоху аналоговых наблюдений оперативный каталог землетрясений формировался по данным, получаемым с сейсмических станций по радиосвязи. Позднее, при поступлении всех сейсмограмм сети в группу сводной обработки, все землетрясения подвергались детальной обработке, и оперативный каталог замещался окончательным. По мере развития сети, ввода в строй телеметрических станций, применения современных технологий передачи данных, оперативный каталог создавался по все большему числу станций и лучше отражал реальную сейсмичность региона. Начиная с 1992 г., оперативный каталог составлялся по данным телеметрических станций с привлечением сведений, получаемых по радиосвязи с региональных станций, с запозданием в одни сутки. В 1996 г. телеметрическая сеть станций была переведена на цифровое воспроизведение сигналов, сейсмограммы стали доступны в реальном времени. Было создано и внедрено методическое и программное обеспечение обработки сейсмограмм с экрана компьютера [5], что позволило проводить обработку в режиме, близком к реальному времени. Сложившаяся конфигурация телеметрической сети позволила уже в 1997 г. получать оперативный каталог Камчатки без пропусков для землетрясений с энергетическим классом  $K_s \geq 8.5$  только по данным телеметрических станций. Кроме того, на основе оперативного каталога создавался окончательный каталог, который являлся результатом обработки данных всех сейсмических станций Камчатки (в том числе не доступных в реальном времени), а также станций соседних регионов. В 2009 г. было закончено переоснащение всех стационарных сейсмических станций Камчатки цифровыми комплектами аппаратуры. Сложилась разномасштабная сеть сейсмических станций с различной разрешающей способностью. На базе компьютерных технологий была создана система сбора, хранения и обработки сейсмологической информации с информационно-коммуникационной системой [6, 7]. Данные всех сейсмометрических каналов стационарных и радиотелеметрических

станций, а также пунктов сильных движений стали доступны сотрудникам регионального информационно-обрабатывающего центра в реальном времени. Появилась возможность отказаться от двухступенчатой системы создания каталога.

Начиная с 2010 г. оперативный каталог становится окончательным. В результате региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов насчитывает 125624 землетрясения за период 1962–2009 гг. (среди них 43889 событий с  ${}^1K_{S1.2}^{\Phi68} > 8.5$ ) и 5168 землетрясений за 2010 г. (1228 событий с  $K_S > 8.5$ ).

Окончательный региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов с  $K_S > 8.5$  опубликован в сборниках «Землетрясения в СССР» за 1962–1991 гг., в сборниках «Землетрясения Северной Евразии» за 1992–2009 гг., а также в «Землетрясения России» за 2004–2006 гг. [8–10]. В связи со значительным усилением сейсмической активности в 2006 г. окончательная обработка землетрясений не была завершена к моменту выпуска сборника «Землетрясения России в 2006 г.», и в опубликованный в этом издании каталог, начиная с 01.06.2006 г., были внесены оперативные данные. В дальнейшем уточненные данные публиковались в сборниках «Землетрясения России» с запаздыванием на один год.

**Методика обработки** и расчета основных параметров землетрясений **регионального каталога** на протяжении 1962–2009 гг. была основана на единых принципах и моделях. На первом этапе создания каталога (1962–1977 гг.) массовое определение гипоцентров велось вручную. Использовались времена вступления прямых  $P$ - и  $S$ -волн на станциях Камчатской сети. Время в очаге рассчитывалось по графику Вадати, а координаты гипоцентра определялись по методу палеток изохрон Ю.В. Ризниченко [11], введенному на Камчатке С.А. Федотовым и И.П. Кузиным [12] с использованием среднекамчатского годографа согласно (табл. 1) [13]. Энергетический класс землетрясений  $K_{S1.2}^{\Phi68}$  определялся по номограмме, разработанной С. А. Федотовым [14].

**Таблица 1.** Скоростная модель Камчатки по [13]

$h$ , км	$V_P$ , км/с	$V_{S-P}$ , км/с	$V_P/V_S$
0-5	4	5	1.8
5-20	5.8	7.9	1.73
20-35	6.7	9.2	1.73
35-120	7.8	10.5	1.74
120-200	8.1	10.7	1.76

Начиная с 1978 г., расчет основных параметров землетрясений для окончательного каталога стал проводиться по программе GIP А.А. Гусева [15]. Для оперативного каталога переход на компьютерные расчеты произошел позднее, в 80-е годы, причем использовалась программа НИРО Ю.Ю. Мельникова [17]. Алгоритмы этих программ обладают как сходными чертами, так и заметными различиями.

В обеих программах оценка времени в очаге землетрясения строилась по графику Вадати. Времена пробега  $P$ - и  $S$ -волн вычислялись по табличным годографам. Для глубин гипоцентров  $h < 200$  км и эпицентральных расстояний  $\Delta < 500$  км годографы основаны на региональной модели среды (табл. 1), вне этой области использовался годограф Джеффриса-Буллена [16]. Расчеты проводились в геоцентрической системе координат без поправок на эллиптичность. Энергетический класс землетрясений определялся по методике С.А. Федотова [14].

В то же время программы GIP и НИРО отличались выбором оценки для окончательного решения. В первом алгоритме оценка гипоцентра соответствовала минимуму функционала невязок, во втором – средневзвешенному решению. Кроме того, программа GIP допускала поиск неединственного решения.

Не менее важные различия обсуждаемых программ относятся к способу вычисления времен пробега волн. В отличие от НИРО, в программе GIP использовалась модель среды, отличающаяся от приведенной в табл. 1 фиксированным отношением скоростей  $v_P/v_S = 1.73$  в правом столбце. Аналогичным образом в GIP был зафиксирован наклон графика Вадати, который в НИРО допускал ограниченное варьирование. Кроме того, в программах использовались таблицы годографов с разными узлами и способами интерполяции. Все это означало различие в годографах, использованных для построения оперативного и окончательного каталогов. Поскольку эти каталоги в предыдущие годы строились на не совпадающем материале и использовались для разных целей, то различия в их алгоритмах были не слишком актуальны. Однако, как отмечено ниже, в методике, используемой с 2010 г. для построения окончательного каталога,

<sup>1</sup> Далее в тексте энергетический класс  $K_{S1.2}^{\Phi68}$  [14] будет обозначаться, как  $K_S$ .

в основном сохранен годограф из НИРО. В результате описанные различия в годографах отразились в появлении некоторых систематических сдвигов статистических характеристик окончательного каталога до и после указанной даты. Этот вопрос подробно обсуждается ниже.

Начиная с 1996 г., для получения кинематических и динамических параметров землетрясений как оперативного, так и окончательного каталога, наряду с ручными замерами на сейсмограммах на фотобумаге, стала применяться программа обработки цифровых сигналов DIMAS [18] для обработки данных, поступающих со станций телеметрической сети. Методика определения основных параметров землетрясений, описанная выше, при этом не изменилась.

Во второй половине 1980-х в Камчатском филиале ГС РАН начал создаваться банк сейсмологических данных Камчатки [5], и все «ручные» землетрясения окончательного каталога были пересчитаны [19]. В процессе пересчета землетрясений было обнаружено достаточно большое количество грубых ошибок. Кроме того, решения, получаемые по программе GIP, даже при отсутствии грубых ошибок, могут несколько отличаться от таковых, получаемых при ручной обработке. Поэтому каталог, имеющийся в настоящее время в фондах КФ ГС РАН и представленный на сайте <http://www.emsd.ru>, отличается от опубликованных в сборниках «Землетрясения в СССР» каталогов [8].

Основные параметры землетрясений Камчатки и Командорских островов, имеющихся в региональном каталоге за 1962–2009 гг., получены по единой методике.

Как уже было сказано выше, в 2010 г. Камчатский филиал перешел на новую, одноступенчатую технологию создания регионального каталога. В результате модернизации сети сейсмических станций в регионе были созданы условия для получения окончательного каталога основных параметров землетрясений в режиме, близком к реальному времени. Также в этот период времени сотрудниками КФ ГС РАН были проведены работы по созданию и отладке программного обеспечения для обработки всего потока сейсмической информации, а именно:

- проведены обязательные в таких случаях исследования по тестированию различных программ локации для выбора наиболее оптимальной в условиях Камчатской сети станций на основе данных искусственно заданных гипоцентров землетрясений [20, 21]. В результате было установлено, что программа локации DIMAS при решении обратной задачи позволяет получать результаты не хуже, чем другие программы, а благодаря своему интерфейсу в условиях оперативной обработки землетрясений оказалась более удобной; ей было отдано предпочтение;

- внедрена программа DIMAS для автоматизированной обработки сейсмических сигналов со встроенной новой программой локации с использованием различных годографов и дополнительной возможностью поиска решений выше уровня моря (автор Д.В. – Дроздин) [18];

- создана новая сетевая база, для хранения и доступа к данным по землетрясениям (автор Е. Пантюхин) [22, 23];

- создан архив калибровок по всем станциям КФ ГС РАН (автор – Ю.В. Шевченко), автоматически используемый программой DIMAS.

Реализованный в программе DIMAS алгоритм расчета гипоцентров изначально был спроектирован для автоматического определения гипоцентров по первым вступлениям продольных волн и впоследствии дополнен возможностью использования волн других типов. Поиск гипоцентра землетрясения производится путем перебора глубины ( $h$ ) и времени в очаге ( $t_0$ ). Диапазон и шаг перебора контролируется пользователем. Для каждой точки сетки ( $t_i, h_i$ ) определяются географические координаты события. Решение с минимальным среднеквадратичным значением невязок времен пробега принимается окончательным. Программа использует геоцентрическую систему координат. Таблицы времен пробега (годографа) сейсмических волн и калибровочные кривые магнитуд загружаются из внешних файлов и контролируются пользователем. Определение постоянно используемых стандартных энергетических характеристик, например таких, как класс по  $S$ -волне, магнитуда по кода-волнам встроено в программу. Для определения параметров тектонических землетрясений используется региональный годограф из программы Ю.Ю. Мельникова [17], применяемый ранее в оперативной обработке. Для локации землетрясений Северной и Авачинской групп вулканов используются локальные годографы [24]. В связи с отсутствием уточненных локальных скоростных моделей для всех остальных вулканических комплексов при расчете положений гипоцентров используется региональный годограф [13, 17]. В соответствии с алгоритмом локации, времена пробега из годографа берутся с учетом фактической разницы между высотой станции и глубиной очага, что позволяет про-

дить поиск решений выше уровня моря при локации вулканических землетрясений. Энергетический класс землетрясений, как и прежде, определяется по методике С.А. Федотова [14].

Следует отметить, что в оперативный каталог землетрясений (он же окончательный, начиная с 2010 г.) не включаются некоторые параметры землетрясений, такие как энергетический класс по  $P$ -волне, класс  $Kc$  по кода-волнам, присутствовавшие в каталоге за 1962–2009 гг.

В связи с переходом на новую программу расчета гипоцентров землетрясений необходимо было провести определенную работу по исследованию совместимости двух каталогов – нового и старого.

Далее приводится **статистический анализ смещений основных параметров каталога, возникших при переходе на новую систему обработки землетрясений.**

Накопившийся после 2010 г. материал свидетельствует о небольших, но статистически устойчивых смещениях ряда характеристик каталога, проявившихся после преобразований системы обработки данных. Для изучения этих смещений было проведено специальное исследование на материале 2008–2010 гг., включавшее параллельную обработку одних и тех же данных по старой и новой процедуре. Использовались только региональные тектонические землетрясения, вулканические из массива данных были исключены. Всего в сравнении участвовало 13190 событий с  $K_S=3.7–15.7$ . Основные изменения в каталоге, по-видимому, определяются двумя факторами:

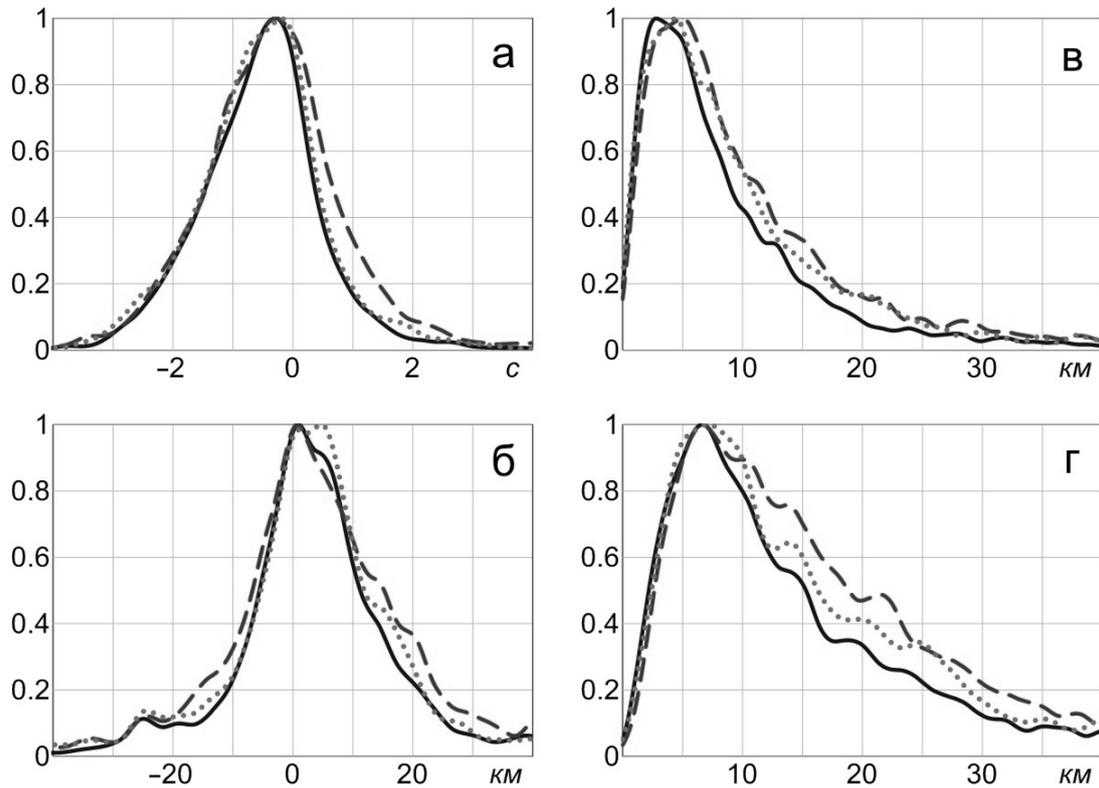
– *Смена коллектива аналитиков.* В 2010 г. вся обработка данных и составление окончательного каталога были переданы из Лаборатории сводной обработки (ЛСО) в Лабораторию исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА). Оба коллектива обладают многолетним опытом обработки данных, однако неминуемо несколько отличаются подходом к принятию некоторых субъективных решений, например таких, как отбраковка исходного материала, идентификация фаз, использование частотных фильтров при исследовании зашумленных сигналов и т.д.

– *Частичная смена компьютерных программ.* При этом формально были сохранены используемая модель среды [13] и номограммы для расчета энергетических характеристик землетрясений [14]. Однако методики расчета гипоцентров в старой и новой программах существенно отличаются.

Для разделения указанных факторов использовалось три варианта параллельной обработки данных, в которых эти факторы присутствовали в различных сочетаниях. Каждый вариант применялся к сегменту каталога продолжительностью около 1 года. Данные 2008 г. (4296 землетрясения) обрабатывались одной группой аналитиков (ЛСО) параллельно по двум программам GIP и DIMAS. Землетрясения 2009 г. (4282 события) были независимо обработаны двумя лабораториями, каждая по своей программе (ЛСО – GIP, ЛИСВА – DIMAS). И, наконец, данные 2010 г. (4612 события) обрабатывались второй группой (ЛИСВА). А расчет параметров землетрясений был проведен для одних и тех же данных обработки с помощью двух программ: DIMAS использовалась аналитиками ЛИСВА, GIP – ЛСО. В первом и третьем случае расхождения инициируются в основном программой обработки, в то время как по данным 2009 г. возможна оценка влияния на результаты разных групп аналитиков.

Ниже представлены статистические распределения смещений различных параметров каталога, построенные по результатам описанной выше параллельной обработки данных за 2008–2010 гг. Фактически эти распределения моделируют изменения в региональном каталоге, возникшие после смены процедуры обработки. Под смещением всюду в дальнейшем (кроме последней части, посвященной энергетическим классам) подразумевается разность между двумя оценками параметра (скалярного или векторного) одного и того же землетрясения: оценка по программе DIMAS минус оценка по программе GIP (независимо от того, какой группой проводилась обработка). Сравнение разделенных по годам распределений смещений позволяет оценить влияние на каталог смены группы аналитиков. По распределениям, построенным по полному набору данных за три года, в первую очередь определяются смещения, вызванные различиями используемых программ вычисления гипоцентров.

На рис. 1 приведены распределения (нормированные гистограммы), статистически характеризующие основные смещения оценок гипоцентра, произошедшие в результате смены системы обработки. Очевидное сходство гистограмм за различные годы означает, что *смещения оценок слабо зависят от того, какой группой аналитиков они получены.* Данные распределения позволяют оценить характерные величины смещений каждого из параметров (табл. 2).



**Рис. 1.** Сглаженные гистограммы смещений параметров гипоцентра по результатам параллельной обработки землетрясений 2008 г. (сплошная синяя линия), 2009 г. (пунктирная красная) и 2010 г. (точечная зеленая) – всего 13190 событий

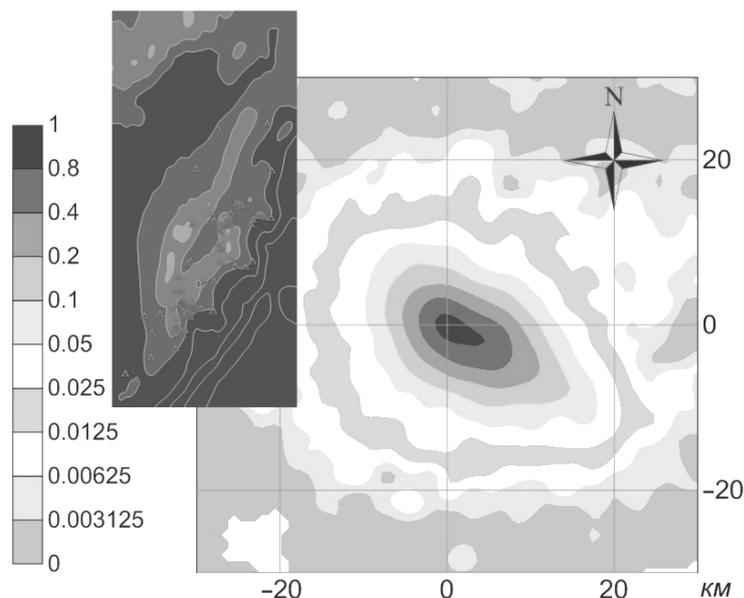
а – смещение оценки времени возникновения землетрясения; б – смещение глубины; в – смещение эпицентра; г – полное смещение гипоцентра (для всех параметров за смещение принята разность (оценка по программе DIMAS минус оценка по программе GIP); все гистограммы нормированы на собственные максимумы).

**Таблица 2.** Характерные значения смещений параметров гипоцентра

Параметр гипоцентра	Наиболее вероятное смещение (мода)	90 % – доверительная область (квантиль) смещения
Время возникновения землетрясения	$-0.3 \text{ с}$	$-2.5 > t < 1.5 \text{ с}$
Глубина	$7 \text{ км}$	$-20 > h < 30 \text{ км}$
Эпицентр (длина 2D вектора)	$5 \text{ км}$	$20 \text{ км}$
Гипоцентр (длина 3D вектора)	$7 \text{ км}$	$30 \text{ км}$

Средние значения двусторонних распределений для времени и глубины значительно отличаются от нуля. Однако, как показано ниже, эти параметры сильно зависят от географического положения землетрясения, и их расчет по полной выборке не имеет практического значения. Заметим, что из представленных гистограмм следует, что приблизительно для 10 % событий различия в оценках времени возникновения землетрясения  $t_0$  превосходят  $2 \text{ с}$ , а в положении гипоцентра –  $20\text{--}30 \text{ км}$ .

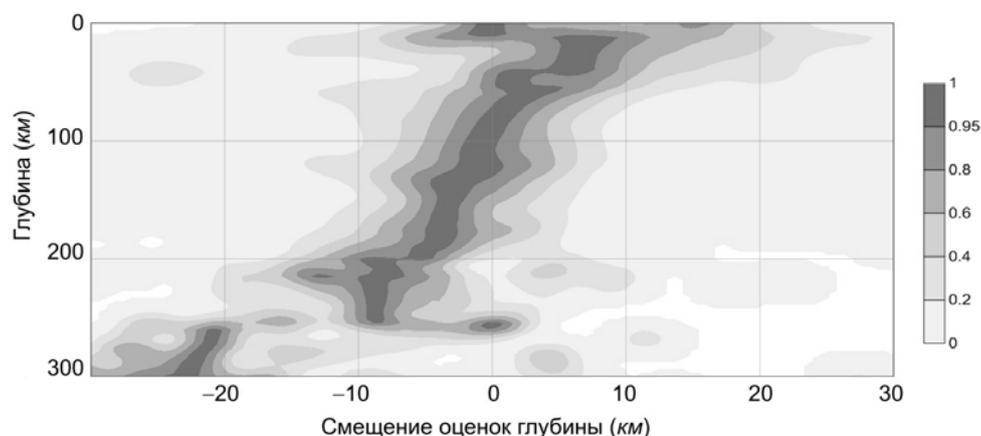
Пространственные смещения гипоцентров не изотропны, а обладают преимущественным направлением, определяемым, по-видимому, простиранием и асимметрией геологической структуры Камчатки (присутствием зоны субдукции), а также соответствующей вытянутой формой Камчатской сейсмической сети. На рис. 2 приведена двумерная гистограмма вектора смещений эпицентра события, построенная по полной трехлетней выборке землетрясений. Изолинии гистограммы вытянуты приблизительно в направлении с северо-запада на юго-восток, практически перпендикулярно камчатским структурам и протяжению сети сейсмических станций. При этом центр распределения располагается юго-восточнее нуля, т.е. в целом преобладают смещения в данном направлении (детальнее см. ниже рис. 6).



**Рис. 2.** Двумерная сглаженная гистограмма вектора смещений эпицентра (по полному набору данных)

Врезка с картой дана для наглядной ориентации направления смещений относительно простирания главных структур Камчатки и расположения сейсмической сети (станции обозначены сиреневыми<sup>2</sup> треугольниками). Гистограмма нормирована на максимум.

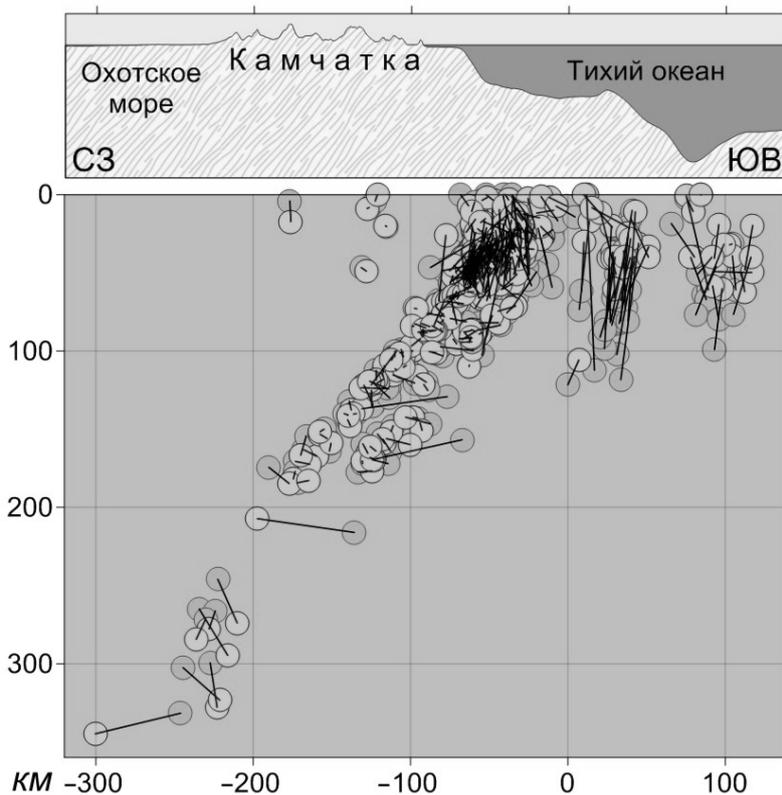
строенного в южной части Камчатки, на который нанесены обе оценки положения каждого землетрясения (рис. 4). Для событий промежуточной глубины, произошедших под Камчаткой, характерны, за редким исключением, небольшие смещения оценок. Глубины мелкофокусных землетрясений, произошедших вблизи океанического желоба (по обе стороны), и посчитанные по DIMAS, существенно завышены, т.е. гипоцентры опущены, по сравнению с GIP. Для глубокой части сейсмофокальной зоны, расположенной по другую (северо-западную) сторону Камчатки, оценки глубины  $h$  гипоцентров по DIMAS, наоборот, располагаются выше, чем по GIP. Таким образом, обсуждаемые смещения зависят не только от глубины событий, но и от их расположения относительно оси Камчатки.



**Рис. 3.** Зависимость смещений оценок глубины гипоцентра от самой глубины

Представлена двумерная сглаженная гистограмма указанных параметров (по полному набору данных); каждый горизонтальный срез гистограммы нормирован на собственный максимум; для глубин  $h > 300$  км количество данных невелико и гистограмма имеет хаотический характер.

<sup>2</sup> Цветные рисунки приведены в электронном варианте статьи в приложении к сборнику на CD.



**Рис. 4.** Разрез сейсмичности в южной части Камчатки, вкrest простираения зоны субдукции (ширина разреза 35 км)

Каждому землетрясению соответствуют две оценки координат гипоцентра: по программе DIMAS – розовые кружки (в сером варианте рисунка – более темные), по GIP – голубые (более светлые). Соответствующие гипоцентры соединены линиями. На верхней врезке – рельеф вдоль разреза, вертикальный масштаб которого увеличен в 10 раз.

Таким образом, смещение оценок параметров гипоцентров существенно зависит от географического положения землетрясения. Изменение в плане продемонстрировано на картах рис. 5 для двух параметров: смещения времени возникновения землетрясения и длины трехмерного вектора смещения координат. Карты построены отдельно для каждого указанного выше, временного интервала, а также (правый столбец) суммарно по всему трехлетнему набору данных. Значение в каждой точке карты отражает локальное среднее смещение, полученное путем ядерного сглаживания точечных данных (смещений для отдельных землетрясений, помещенных в эпицентр). Во избежание наложения разнородных данных (мелкофокусных и глубоких землетрясений с близкими эпицентрами) при построении карт использованы только события, произошедшие в зоне субдукции.

При сравнении карт каждого из параметров прежде всего обращает внимание сходство результатов за разные годы. Это дополнительно и весьма убедительно подтверждает сформулированный выше вывод о малом влиянии на возникшие смещения смены коллектива аналитиков. Таким образом, главную причину смещений, по-видимому, следует искать в различии методик (программ) расчета гипоцентров.

Все карты на рис. 5 обладают общим свойством – минимальные смещения обоих параметров наблюдаются вблизи продольной оси Камчатки. Но, по-видимому, еще важнее, что вблизи этой оси располагается большинство станций Камчатской сейсмической сети. Таким образом, смещения минимальны, если эпицентр располагается в пределах поля сети, и растут по мере удаления от нее. Последний вывод подтверждается ростом смещений в южном направлении, где сеть заканчивается.

Карты смещений времени возникновения землетрясения (верхний ряд на рис. 5) обладают очевидной асимметрией. Рассматриваемая величина меняет знак вблизи оси Камчатки (или сети станций). Согласно программе DIMAS, землетрясения, локализованные северо-западнее, в среднем происходят несколько позже (на 0.5–1.5 с), чем по результатам GIP. Юго-восточнее

Камчатки (ближе к океаническому желобу) ситуация обратная – оценки времени  $t_0$  по DIMAS в среднем примерно на ту же величину раньше, чем по GIP.

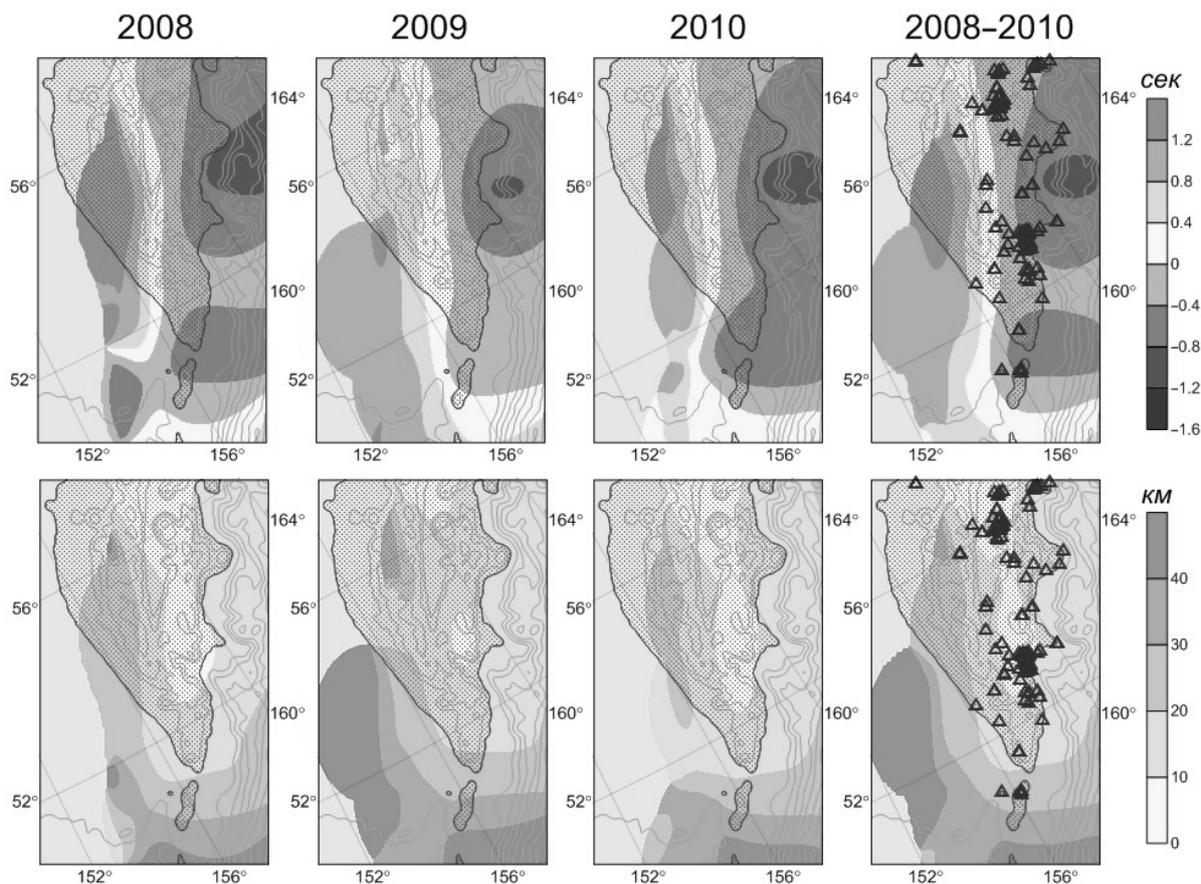


Рис. 5. Карты пространственных распределений смещения двух скалярных параметров гипоцентра для различных периодов параллельной обработки данных

Верхний ряд – смещение оценки времени возникновения землетрясения; нижний ряд – абсолютная величина трехмерного вектора смещения оценки координат; в правом столбце – суммированные данные трех предыдущих столбцов. На картах изображено локальное среднее значение смещения, полученное путем ядерного сглаживания точечных данных (смещений для отдельных землетрясений, помещенных в эпицентр); при построении использованы только землетрясения зоны субдукции; на картах правого столбца нанесены сейсмические станции Камчатской сети.

Асимметрия присутствует и в пространственных смещениях гипоцентров, однако там она выражена несколько иначе. На картах пространственного смещения гипоцентров (нижний ряд рис. 5) асимметрия не видна, поскольку там представлена абсолютная величина вектора смещения. Поэтому на рис. 6 представлены средние векторные смещения между двумя оценкам эпицентров.

В соответствии с предыдущими картами, длины векторов на рис. 6 минимальны в центральной части и на восточном шельфе Камчатки, несколько возрастают к юго-востоку, сильнее – к югу, особенно велики на западе (для глубоких землетрясений Охотского моря). Однако направления всех смещений мало меняются. Для всех районов оценки гипоцентров, полученные по программе DIMAS, имеют тенденцию к смещению в юго-восточном направлении (от континента к океану) относительно оценок по GIP. Этот факт отражен и на гистограмме рис. 2. Напомним также, что асимметричны относительно оси Камчатки и смещения оценок глубин землетрясений (рис. 3 и 4).

Приведенные закономерности указывают на то, что главными причинами смещений являются различия в методиках расчета координат гипоцентра и времени возникновения землетрясения. Алгоритмы двух программ сильно отличаются, однако, по-видимому, одной из главных причин смещения оценок является использование различных годографов времен пробега сейсмических волн.

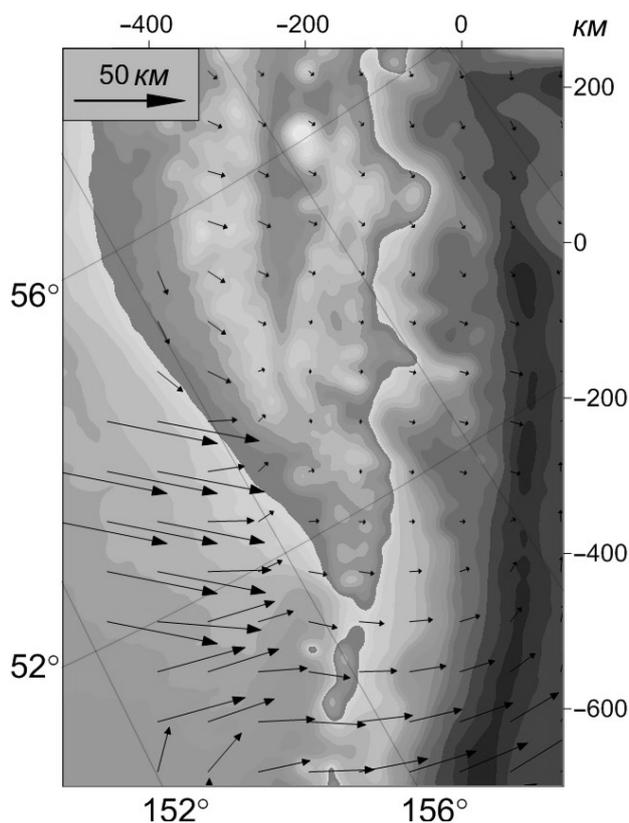


Рис. 6. Карта пространственного распределения локально средних векторов смещения эпицентров

Масштаб векторов (отличный от масштаба карты) указан в левом верхнем углу; при построении использованы только землетрясения зоны субдукции за весь трехлетний период сравнения.

Специальное исследование, проведенное аналогично предыдущему, т.е. используя параллельную обработку материала по двум процедурам, показало, что данное смещение «графиков повторяемости» в основном не связано с природными изменениями сейсмичности региона, но имеет методический характер. В данном случае оказалось, что изменение в оценках классов связано в первую очередь с трудно регламентируемым отличием в работе двух групп аналитиков. При обработке цифровой сейсмограммы аналитик принимает решение о необходимости дополнительной частотной фильтрации канала (обычно в случае зашумленного сигнала). Но фильтрация может приводить к изменению измеряемой максимальной амплитуды волны, обычно в сторону ее занижения. Соответственно, это приводит и к занижению класса. До 2009 г. включительно широко применялось измерение энергетических классов по отфильтрованным каналам. Начиная с 2010 г. эта процедура почти не используется.

Формально обе программы используют одинаковую модель среды [13], но предварительный анализ показывает, что годографы, участвующие в окончательных расчетах по двум программам, отличаются по времени пробега  $P$ -волн до 2–3 с. Отличается также и способ оценки времени возникновения землетрясения. Все эти тонкие вопросы требуют дополнительных исследований. Пока можно только оценить окончательные изменения в каталоге, связанные с переходом на новую методику.

Изменения в системе обработки сказались и на энергетических оценках землетрясений. Однако их изменение имеет иные причины, чем описанные выше смещения гипоцентров. На рис. 7 приведены два распределения землетрясений по энергетическому классу, построенные по окончательному Камчатскому региональному каталогу за 2009 и 2010 гг., т.е. полученные по старой и новой процедуре обработки. График за 2010 г. фактически смещен относительно предыдущего периода на 0.2–0.4 единицы класса  $K_S$  в сторону высоких значений. Причем заметен в первую очередь недостаток слабых событий, что несколько неожиданно, поскольку в этот период происходил рост числа станций, участвовавших в работе сети.

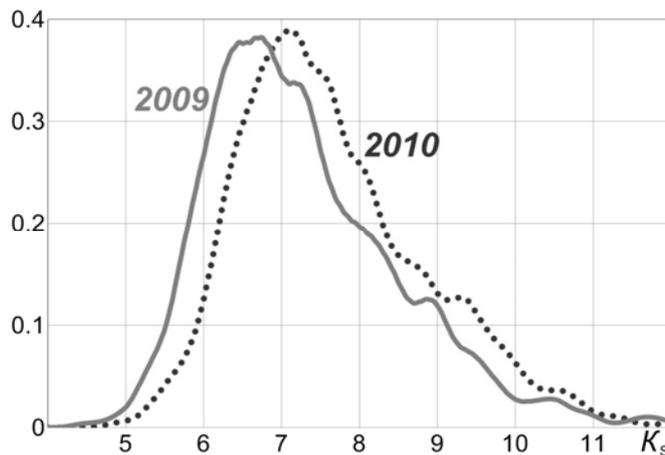


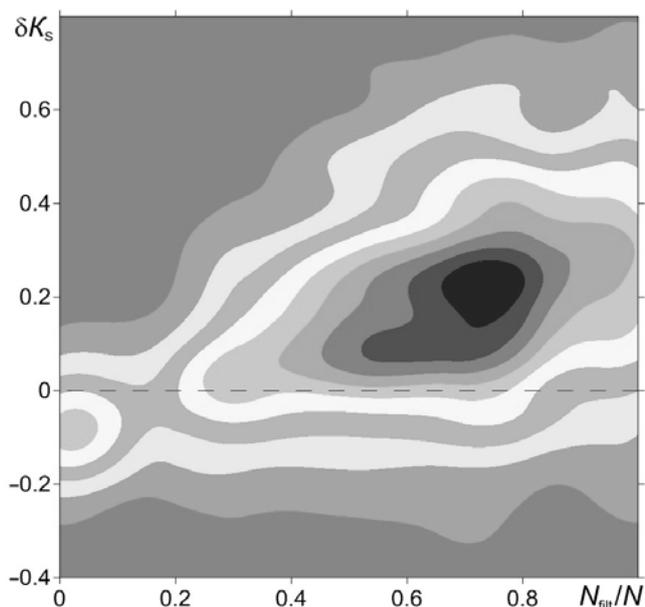
Рис. 7. Распределения землетрясений по энергетическому классу (соответствуют «закону повторяемости» с линейным вертикальным масштабом)

Оба графика построены по окончательному камчатскому региональному каталогу за интервалы в один год до и после перехода на новую систему обработки данных (графики нормированы каждый на свой интеграл).

Двумерная гистограмма, построенная по протоколам обработки отдельных каналов 2009 г. (для двух процедур), демонстрирует корреляцию между смещением классов и относительным (для данного землетрясения) числом каналов, подвергнутых фильтрации. Из гистограммы следует, в частности, что, если каждые семь из десяти каналов фильтровались, характерное занижение класса составляло 0.2.

Таким образом, прекращение использования фильтрованных каналов для измерения энергетических характеристик волн сыграло главную роль в систематическом смещении графика повторяемости землетрясений в Камчатском региональном каталоге на рубеже 2009–2010 гг.

Подводя итог всему выше изложенному, следует отметить, что переход на новую систему обработки в 2010 г. привел к систематическому смещению оценок параметров гипоцентров, которое зависит от географического положения землетрясения. Смещения минимальны для эпицентров, расположенных в пределах поля сети сейсмических станций Камчатки, и растут по мере удаления от нее. Это факт необходимо учитывать при выполнении исследований, связанных с пространственно-временными распределениями землетрясений.



**Рис. 8.** Зависимость оценок энергетического класса  $K_S$  от частоты использования фильтрованных каналов

Приведена сглаженная гистограмма двумерного параметра  $(N_{\text{filt}}/N, \delta K_S)$ , где  $N$  – полное число каналов, на которых записано землетрясение; из них  $N_{\text{filt}}$  – число каналов, подвергнутых фильтрации, т.е.  $N_{\text{filt}}/N$  – доля фильтрованных каналов;  $\delta K_S$  – разность классов данного землетрясения, полученная по двум процедурам обработки (новый минус старый, фильтрация применялась только при старой процедуре). Новые классы в целом выше старых классов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Федотов С.А. К 25-летию детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах, XI.1961–X.1986: история, развитие и задачи // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 6. – С. 3–10.
2. Чебров В.Н., Дрозин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сениюков С.Л., Сергеев В.А., Синицын В.И., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Детальные сейсмологические наблюдения на Камчатке. Современное состояние (2011 г.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. – Петропавловск-Камчатский: Холдинговая компания «Новая книга», 2012. – С. 36–69.
3. Чебров В.Н., Матвеев Е.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В., Музуров Е.Л. (сост.). Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
4. Чеброва А.Ю., Матвеев Е.А. Состояние окончательного каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов в 2013 году // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 122–126.
5. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Дрозин Д.В., Козырева Н.П., Левина В.И., Сергеев В.А., Сениюков С.Л., Ящук В.В. Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. – С. 43–61.
6. Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н. Основные результаты сейсмологических исследований на Камчатке по данным детальных наблюдений 1961–2011 гг. // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. – Петропавловск-Камчатский: Холдинговая компания «Новая книга», 2012. – С. 39–35.

7. **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сениюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.** Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
8. **Землетрясения в СССР.** Ежегодники за 1962 – 1991 гг. – М.: Наука, 1964–1997.
9. **Землетрясения Северной Евразии.** Ежегодники за 1992–2009 гг. – Обнинск: ГС РАН, 1997–2015.
10. **Землетрясения России.** Ежегодники за 2004–2010 гг. – Обнинск: ГС РАН, 2006–2012.
11. **Ризниченко Ю.В.** Методы массового определения координат очагов близких землетрясений и скоростей упругих волн в области расположения очагов // Изв. АН СССР. – Серия геофизическая – 1958. – № 4. – С. 425–437.
12. **Федотов С.А., Кузин И.П., Бобков М.Ф.** Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–1962 гг. // Изв. АН СССР. – Серия геофизическая. – 1964. – № 9. – С. 1360–1378.
13. **Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
14. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 116 с.
15. **Гусев А.А.** Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1979. – № 1. – С. 74–81.
16. **Jeffreys H. and Bullen К.Е.** Seismological Tables. – London: British Association for the Advancement of Science, 1940.
17. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
18. **Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.** Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – 2010. – 46. – № 3. – С. 22–34.
19. **Левина В.И., Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Лепская Т.С.** Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов: пересмотр событий 1971–1988 гг. // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский – Петропавловск-Камчатский: «Оттиск», 2006. – С. 21–28.
20. **Назарова З.А.** Оценка результатов определения координат гипоцентров программами NIPO, GIP и ARC в условиях Камчатской сети радиотелеметрических станций // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2006. – № 2. – С. 188–194.
21. **Назарова З.А.** Тестирование программ расчета координат гипоцентров землетрясений (DIMAS, ARC) на точность и устойчивость в условиях камчатской сети радиотелеметрических станций // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 томах. Труды региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. – Т. 2. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. – С. 191–195.
22. **Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Бахтиарова Г.М., Сениюков С.Л., Пантюхин Е.А.** Банк сейсмологических данных Камчатки // Открытое образование. – 2008. – № 4. – С. 16–22.
23. **Чебров В.Н., Бахтиарова Г.М., Дрознин Д.В., Дубровский Н.И., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Пантюхин Е.А., Сениюков С.Л., Сергеев В.А.** Информационные ресурсы Камчатского филиала Геофизической службы РАН в Internet // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. (Труды Второй научно-технической конференции). – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 302–305.
24. **Сениюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.