

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПРЕДВЕСТНИКА TAU В СЕЙСМООПАСНЫХ ЗОНАХ КАМЧАТКИ

Славина Л.Б.¹, Кучай М.С.^{1,2}, Лиходеев Д.В.¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, slavina@ifz.ru

² Геофизическая Служба РАН, г. Обнинск

Аннотация

Рассматриваются результаты расчета кинематического предвестника TAU (аналога V_p/V_s) в краткосрочном и долгосрочном аспекте для выявления тревожного интервала времени и областей повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений и извержений вулканов.

Зависимость устойчивости выявления предвестника от способа определения времени в очаге – T_0 и ошибок в определении параметров гипоцентров. Приводятся результаты анализа достоверности и эффективности предвестника в зависимости от методики определения параметров гипоцентров.

Методические особенности выявления кинематического предвестника TAU

Кинематический предвестник основан на слежении за вариациями времен пробега P- и S-волн от слабых, региональных землетрясений. Наблюдаются изменения отношения времен пробега T_S/T_P – параметр TAU (аналог отношения скоростей V_p/V_s) в пространстве и времени. Проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны, и оконтурить область их локализации.

Мониторинг и расчеты прогностических параметров проводятся на основе оперативного определения параметров гипоцентров землетрясений, осуществляющихся региональными филиалами Геофизической службы РАН и Республиканским сейсмологическим Центром Азербайджана (РЦСС НАНА).

Поведение прогностического параметра оценивается в двух модификациях – в краткосрочном варианте в виде кривой вариации параметра во времени – «TAU-curve», и в долгосрочном аспекте – в виде результатов картирования по площади параметра Δ TAU и слежения за изменениями выявленных аномалий во времени.

Физической основой метода является представление о направленных изменениях параметров среды, происходящих в период подготовки сильного землетрясения. Под воздействием роста поля напряжений, в период подготовки землетрясения, среда теряет устойчивость, и это отражается в увеличении разброса значений различных геофизических полей. В том числе и в поле времен пробега сейсмических P- и S- волн от региональных, слабых землетрясений. Расчеты прогностического параметра производятся аналитически по формуле: $TAU = (T_S - T_P)/(T_P - T_0) + 1$, где $T_S - T_P$ разность прихода P- и S-волн на станции регистрации, T_P время прихода P-волны, T_0 – время в очаге, определенное по группе станций при оперативной обработке параметров слабых землетрясений.

Наблюдая за динамикой изменения параметра и его дисперсии в пространстве и времени, и проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны (краткосрочный предвестник), и, проводя картирование параметра по площади, оконтурить аномальную зону (долгосрочный предвестник).

Для выявления краткосрочного предвестника [1-3] рассчитывается прогностическая кривая с использованием функционала $\chi = F(\tau)$.

Из ретроспективного анализа, проведенного по сейсмическим данным в различных сейсмоактивных регионах от Камчатки до Туркмении и Кавказа, установлено, что кинематический предвестник в краткосрочном варианте предвещает сильное событие в интервале времени от 1 суток до 15 – 45 дней. Сравнивая фоновые отклонения на кривой с аномальными значениями, можно выделить тревожный интервал времени. По сопоставлению аномалий на прогностических кривых на ряде сейсмических станций, можно оценить район возникновения землетрясения. Учитывая ретроспективные результаты прогнозирования можно указать вероятный диапазон магнитуд.

Анализ последовательного ряда карт долгосрочного предвестника позволяет выявить и оконтурить зону аномалии и проследить ее развитие во времени. Долгосрочный предвестник

формирует аномальную зону за время от нескольких месяцев до 5 – 10 лет, в зависимости от тектонического строения региона и энергии готовящегося события. [4-5].

Для выявления областей подготовки землетрясений по долгосрочному предвестнику производится картирование параметра ΔTAU на равномерной сетке. Размер ячеек, шаг по площади и времени устанавливается экспериментально. Для каждой ячейки рассчитывается сумма $\Delta TAU/N$ где N – число землетрясений в ячейке.

Расчеты прогностического параметра для Камчатской фокальной зоны в краткосрочном и долгосрочном аспекте производятся длительное время. С 2010 г. изменилась программа определения параметров гипоцентров. В новой программе Дрозина Д.В. сменился принцип определения T_0 , параметра, который играет важную роль в расчетах ΔTAU . Согласно данным представляемым в оперативном каталоге КФ ГС, при определении параметров гипоцентров, ошибки в определении времени в очаге T_0 ($Error T_0$) достигают 1.5–2.5 сек. Ошибки носят случайный характер. На рис.1 приведены графики распределение ошибок времени в очаге – T_0 и статистические характеристики распределения за 2012 г. Среднее значение – 1.45672584, стандартная ошибка – 0.01672103, стандартное отклонение – 0.5763301, дисперсия выборки – 0.33215638, эксцесс – 0.66252275, асимметричность – 0.58349244, минимум – 0.112244, максимум – 4.4846, уровень надежности (95.0%), 0.03280603.

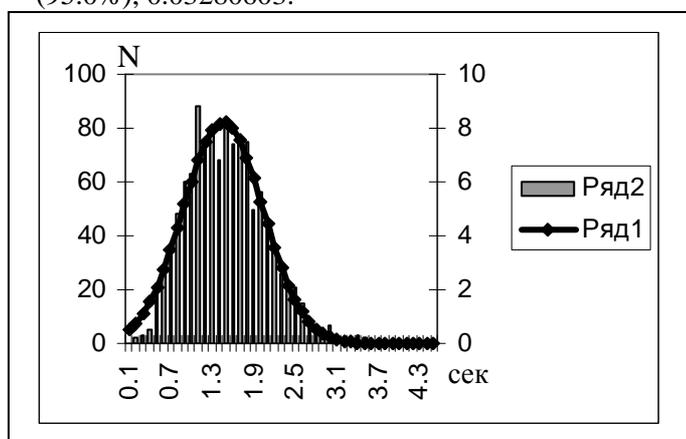


Рис. 1. График распределения ошибок в T_0 имевших место при определении параметров гипоцентров землетрясений 2012 г. по данным КФ ГС (сплошная кривая – нормальное распределение Гаусса)

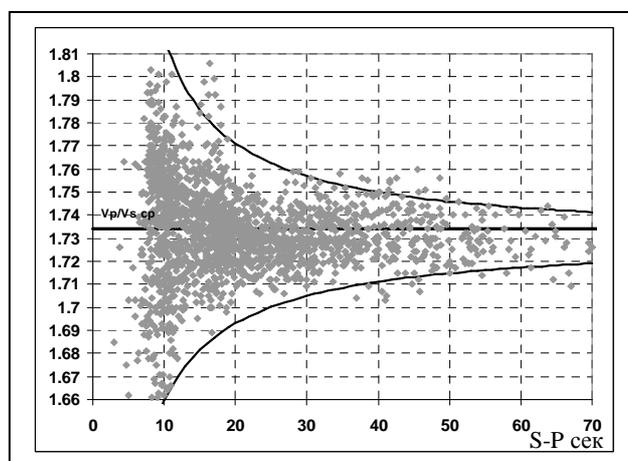


Рис. 2. Распределение Vp/Vs от S-P для станции Русская (точки), линии – теоретические значение вычисляемого Vp/Vs , при ошибках в определении $T_0 = \pm 1.46$ сек.

Такие значения величины ошибки приводят к случайному разбросу значений времен пробега T_S и T_P , что в свою очередь, приводит к случайному разбросу величин ΔTAU . В связи, с чем невозможно выявить направленные изменения отношения T_S/T_P – параметра ΔTAU . Пример результатов распределения параметра Vp/Vs от значений S-P (т.е. от расстояния), при расчете по программе Дрозина Д.В. показан на рис. 2.

Можно видеть значительную зависимость ΔTAU (Vp/Vs) от S-P, т.е. от расстояния. Особенно значителен разброс значений на малых S-P в пределах 5–6 сек. В этой связи, нами была разработана программа переопределения T_0 , по результатам которой производится пересчет T_0 и параметра ΔTAU по данным времен вступлений P и S-P на станциях Камчатской сети.

Это обстоятельство заставило нас также изменить программу расчета и картирования долгосрочного предвестника. На первом этапе определяется среднее значение ΔTAU для единичного землетрясения, по всем станциям его записавшим. Далее в ячейке определяется сумма средних значений и делится на число событий (программа «all station»)

Сейсмическая активность на Камчатке в 2013 г.

Для оценки эффективности кинематического предвестника необходимо привести данные о сейсмической активности в рассматриваемый период наблюдений.

В течение 2013 г. повышенная активность наблюдалась на севере Камчатки, в районе Карагинского залива и поселка Ильпырский в Корьякии, где 13.03.2013 г. произошло сильное, ощутимое землетрясение $K_s = 13.9$ ($M = 6.0$).

Активизация наблюдалась на юге Камчатки и Северных Курильских островах.

28.02.2013 г. в этой зоне произошло землетрясение с $M_w = 6.9$ сопровождавшееся серией афтершоков. Далее, 24.03.2013 г., восточнее, на расстоянии ~ 80 км произошло следующее сильное событие с $M_w = 6.1$, так же сопровождавшееся афтершоками. В мае, 18-21.05.2013 г. возник сильный рой, (активность в области роя продолжается до настоящего времени). Роевые последовательности в этой зоне, к юв от п-ова Шипунский имели место и ранее в 2001, 2002, 2003 гг. Карты расположения роев и наблюдавшихся сильных событий на юге Камчатки в 2013г показаны на рис. 3

В период развития роевой активности 24 мая в Охотском море произошло сильнейшее за время наблюдений глубокое землетрясение $M_w = 8.3$, $H = 630$ км. Оно ощущалось на большой территории, в городах Сибири и даже в Москве. Сопровождалось серией глубоких афтершоков.

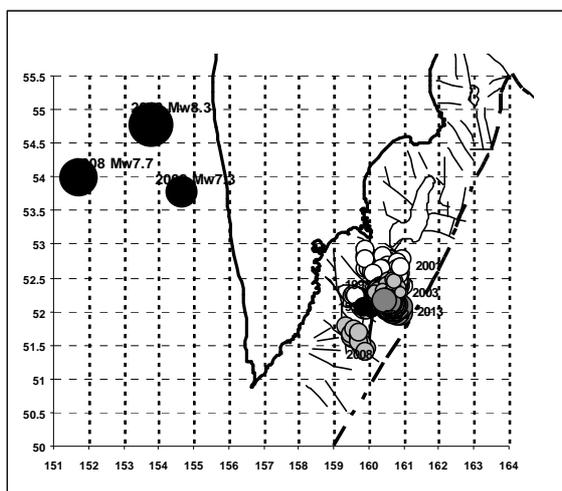


Рис. 3. Карта расположения роевых последовательностей в Авачинском заливе и сильных глубоких Охотских землетрясений произошедших в 2008 и 2013 гг. (одновременно, или вслед за роем)

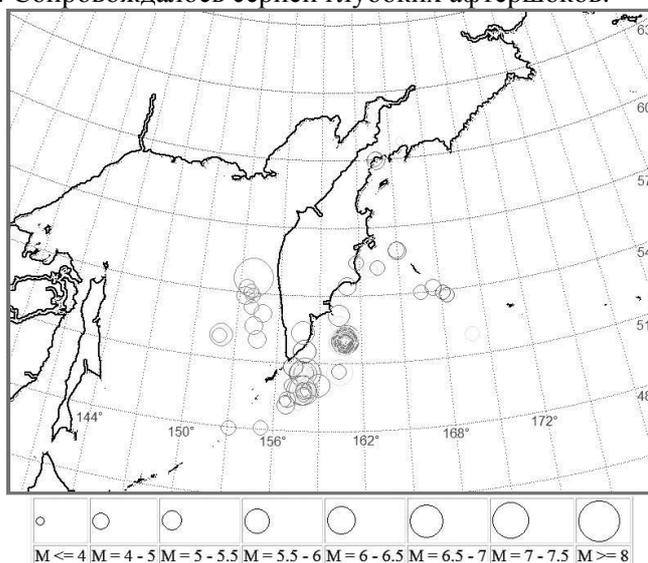


Рис. 4. Карта расположения очагов землетрясений в период с 01.03.-27.08.2013 по данным КФ ГС РАН, $K_s \geq 11$.

Временная связь сильного глубокого землетрясения в Охотском море и роевой активности в Авачинском заливе также наблюдалась в 2008 г. Когда с 31 мая по 6 июня наблюдался рой, и вслед за ним 5 июля произошло также сильное глубокое землетрясение в Охотском море $M = 7.1$, $H = 664$ км. Вероятно, сеймотектоническая связь этих событий не случайна и требует специального исследования.

Землетрясение 24 мая, безусловно, повысило вероятность возникновения сильного землетрясения в Камчатской фокальной зоне. Карта эпицентров землетрясений $K_s \geq 11$ в районе Камчатки, Северных Курильских островов и Охотского моря по данным КФ ГС РАН за период март-август 2013 г. приведена на рис. 4.

По данным Камчатской сети сейсмических станций в прогностическом Центре ИФЗ РАН осуществляется мониторинг, в режиме близком к реальному времени, прогностического параметра TAU (аналога V_p/V_s). Рассчитываются прогностические кривые по программе «TAU curve». Перед указанными выше сильными событиями наблюдались аномалии параметра, в 3-4 раза превышающие фон. Прогностические кривые и заключения по электронной почте своевременно передавались в КФ РЭС.

На рис. 5 приведены прогностические кривые по группе станций на Северо-Курильск (SKR) и группе станций Налычево – Дальнее (NLC, DAL). На кривых четко фиксируются аномалии, предвещавшие сильные землетрясения (моменты землетрясений показаны стрелкой).

Для выявления аномальных областей по долгосрочной модификации предвестника применялась программа картирования параметра delta TAU по площади. Картирование производится на равномерной сетке. Размер ячеек, шаг по площади и времени устанавливается экспериментально. Для каждой ячейки рассчитывается сумма значений delta TAU/N, где N – число событий в ячейке. Значения delta TAU рассчитываются как по данным одной станции, например, таких как станция Северо-Курильск (SKR), так и по группе станций, зарегистрировавших единичные землетрясения. В последнем случае они именуется «all station». Картирование параметра в долгосрочном аспекте по данным Камчатской сети станций за периоды 2009-2012 и 2013 г. приведены на рис. 6. Наблюдаются обширные аномалии на юге Камчатки, в Авачинском заливе и в Охотском море (в области сильного события 24.05.2013 г.). Показаны эпицентры сильных событий за этот период. Можно видеть

обширную аномалию в центральной части фокальной зоны и на стыке Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Сравнивая карты delta TAU по данным станции Северо-Курильск и «all station» за период 2009–2012 гг. и 2013 г. можно видеть обширную положительную аномалию в Охотском море, вероятно связанную с подготовкой Охотского сильного землетрясения 24 мая 2013 г.

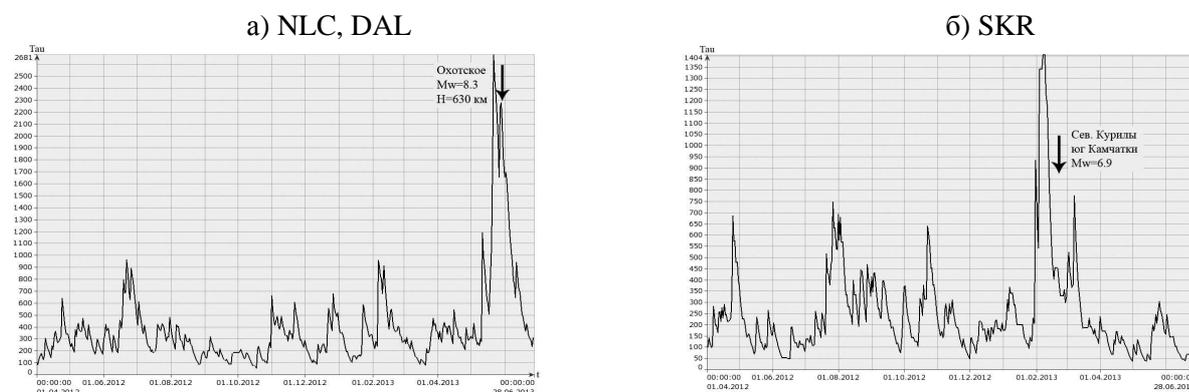


Рис. 5. Примеры прогностических кривых рассчитанных по параметру TAU по станциям КФ ГС. Наблюдаются аномалии, предвещающие сильные землетрясения: в Охотском море (NLC, DAL) и по станции SKR.

Заклучение

В результате мониторинга кинематического предвестника, как в краткосрочном, так и в долгосрочном варианте за последние годы удалось выявить особенности появления аномалий предвещающих сильные события.

Предвестник выявлен при подготовке событий разного масштабного уровня, от извержения вулкана до сильного землетрясения.

На приведенных рисунках показаны результаты расчетов прогностических кривых в периоды подготовки и реализации ряда сильных землетрясений. В течение последних пяти лет проводился мониторинг в оперативном режиме (близком к реальному времени) с передачей результатов расчетов и заключений в Региональные Центры прогноза (КФ РЭС). Накопленный длинный ряд наблюдений и опыт прогнозирования в режиме близком к реальному времени позволяет провести статистический анализ, выявить особенности появления предвестника, определить чувствительность станций наблюдения. Результаты выявления и реализации аномалий в оперативном режиме достаточно обнадеживающие, что вселяет оптимизм [6].

Подготовка землетрясения представляет собой длительный, сложный процесс. Для выявления опасной зоны и определения места возможного сильного события используется модификация параметра TAU в виде картирования параметра delta TAU по площади и суммирования во времени.

Литература

1. Славина Л.Б., Горельчик В.И. Отражение физических процессов подготовки землетрясений и извержений вулканов в поле времен пробега сейсмических волн // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясений. М.: Наука, 1989. С.44-53.
2. Славина Л.Б., Соловьев Н.В., Левина В.И. Краткосрочный кинематический предвестник в период подготовки Кроноцкого землетрясения // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГАРФ, 1998. С.121-133.
3. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Рогожин Е.А. Оценка сейсмической обстановки на камчатке по данным мониторинга прогностического параметра TAU // Геофизические исследования. 2007. № 8, С. 3-8.
4. Славина Л.Б., Левина В.И., Бахтиарова Г.М. Мониторинг прогностического параметра TAU по данным сейсмических станций Камчатки // Тр. региональной научно-техн. конф. "Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России". Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 2. С. 69-73.
5. Славина Л.Б., Етирмишли Г.Д, Абдуллаева Р.Р., Мячкин В.В., Фараджев В.А. Результаты проведения мониторинга долгосрочного кинематического предвестника землетрясений $\xi\tau$ для сейсмоопасных зон Азербайджана и приграничных районов Каспия и Дагестана // Catalogue of seismoforecasting research carried out in Azerbaijan territory in 2008. Baku: 2009. С. 158-163.
6. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. Москва: Светоч Полнос, 2011. 304 с.

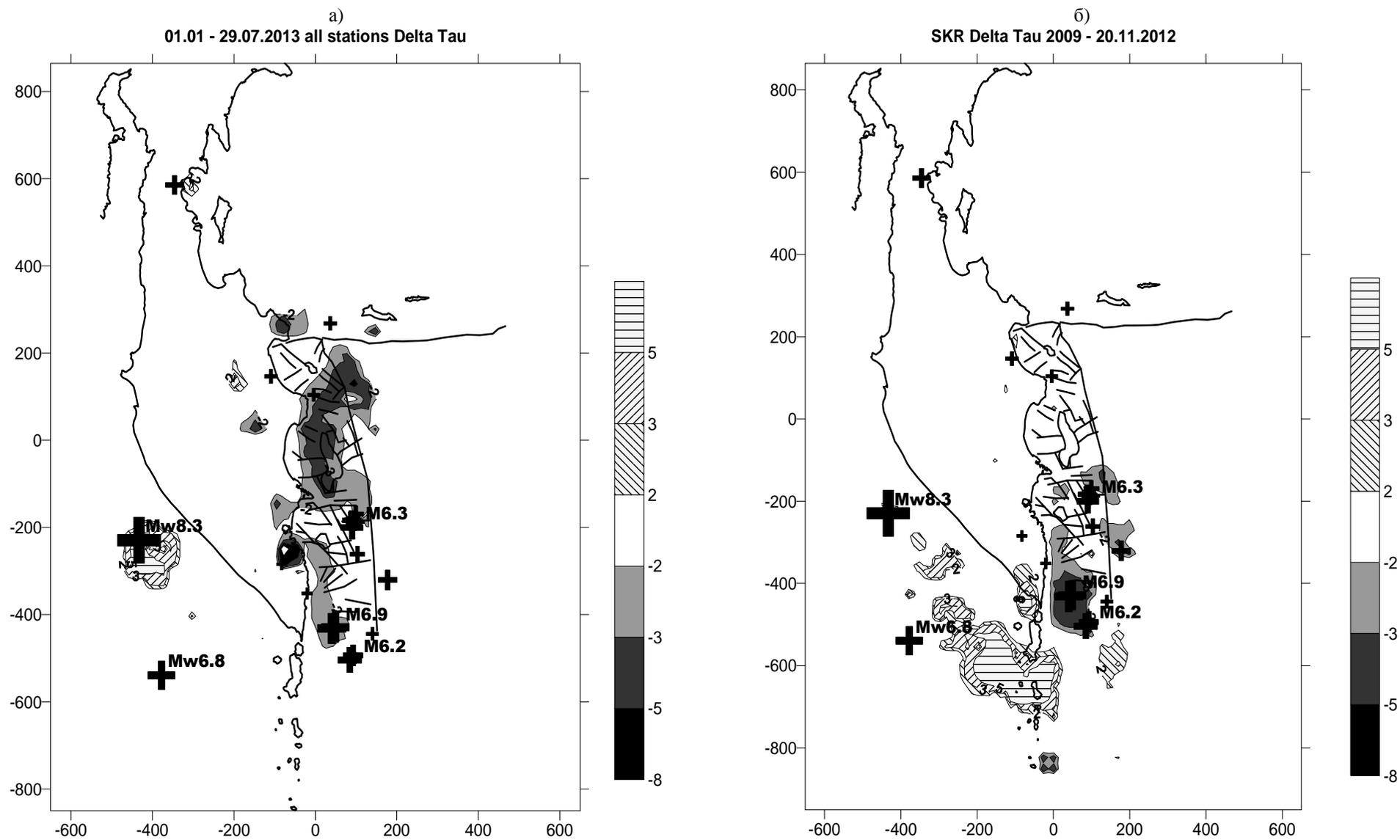


Рис. 6. Результат картирования долгосрочного параметра delta TAU по группе станций Камчатской сети «all station» (а) и станции Северо-Курильск (SKR) (б), за периоды 2009-2012 гг. и 2013 г. (до 29.07)