

# Построение пространственно-временных полей величины $V_p/V_s$

Егор Подоляко

## **Аннотация**

Предложен алгоритм оценки  $V_p/V_s$  на основе данных о временах прихода P- и S-волн. Алгоритм основан на идеях работы японского ученого К. Вадати [3]. Алгоритм апробирован на данных по полуострову Камчатка за период 2007–2022 гг. Получены пространственно-временные распределения отношения  $V_p/V_s$ , которые могут использоваться для выявления предвестниковых аномалий.

## **Основные предположения**

1. Сильным землетрясениям предшествуют аномально большие или аномально малые значения некоторых из наблюдаемых процессов. Сами значения процессов, если они стационарны, влияют мало.
2. Аномальные процессы, которые предшествовали сильным землетрясениям в прошлом, могут предшествовать аналогичным землетрясениям в будущем (для данного региона).
3. В качестве значения процесса предлагается рассмотреть отношение скоростей распространения P- и S-волн.

## **1 Алгоритм**

### **1.1 Входные данные**

Сейсмические события и сейсмологические станции в интересующем регионе, времена приходов P- и S-волн на станции.

### **1.2 Предварительная обработка данных**

Для каждой пары “событие–станция” необходим следующий набор величин: координаты станции, координаты эпицентра события, время начала землетрясения  $t_e$ , времена прихода P- и S-волн  $t_p$  и  $t_s$  на станцию. Времена, затраченные на путь волнами:

$$\Delta t_p = t_p - t_e \quad (1)$$

$$\Delta t_s = t_s - t_e \quad (2)$$

### 1.3 Оценка

Предложим следующую оценку для отношения скоростей волн на пути от землетрясения до станции:

$$\frac{V_p}{V_s} \simeq \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \quad (3)$$

Предполагается, что траектории распространения волн отличаются незначительно, и отношение  $V_p/V_s$  неизменно на протяжении всего пути волн. Линейная регрессия по величинам (1, 2) для событий из одной пространственно-временной области позволяет связать:

$$\Delta \mathbf{t}_s = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Delta \mathbf{t}_p + \epsilon \quad (4)$$

где  $\Delta \mathbf{t}_s$  и  $\Delta \mathbf{t}_p$  – векторы времен в пути,  $\beta_0$  – свободный член регрессии,  $\beta_1$  – наклон регрессии,  $\epsilon$  – вектор ошибок. Более того, из предположения неизменности  $V_p/V_s$  на пути распространения волны следует близость  $\beta_0$  и  $\epsilon$  к нулю. Получаем оценку интересующей нас величины для некоторого региона:

$$\frac{V_p}{V_s} \simeq \beta_1 \quad (5)$$

### 1.4 Пространственно-временная сетка

Интересующий регион поверхности можно задать через минимальные-максимальные широту и долготу. Для простоты предлагается рассматривать двухмерную пространственную сетку, без учета глубин событий. Введем параметры сетки:  $n_{\text{lat}}$  – число шагов по широте,  $n_{\text{lon}}$  – число шагов по долготе,  $n_{\text{periods}}$  – число временных отрезков. Таким образом, общее число узлов сетки:

$$N = n_{\text{lat}} \cdot n_{\text{lon}} \cdot n_{\text{periods}} \quad (6)$$

Введем два параметра, отвечающих за локальность оценки:  $R_e$  – максимальное расстояние от узла до события,  $R_s$  – максимальное расстояние от узла до станции. Пара “событие–станция” участвует в расчетах для узла, если выполнено:

$$\begin{cases} r_e < R_e, \\ r_s < R_s \end{cases} \quad (7)$$

где  $r_e$  и  $r_s$  расстояния от узла до события и станции соответственно. Чем меньше область вокруг узла, тем лучше выполнены требования локальности, и тем точнее оценка (5). Однако уменьшение области приводит к уменьшению количества точек для линейной регрессии. Поэтому подбор параметров  $R_e$  и  $R_s$  является отдельной задачей.

## 1.5 Выходные данные

Основным результатом работы алгоритма является набор из  $N$  оценок величины  $V_p/V_s$ . Дополнительно для каждого из  $N$  узлов пространственно-временной сетки можно вывести число точек регрессии и коэффициент детерминации  $R^2$ , что позволит оценить применимость метода для каждого из узлов сетки.

## 1.6 Реализация

В рамках работы алгоритм был реализован на языке программирования Python [2]. Ниже перечислены основные этапы реализованного алгоритма:

1. Заданный регион и временной интервал разбиваются на трёхмерную сетку (шириота, долгота, время), после чего для каждого события и каждой станции определяется область узлов сетки, находящихся в заданном пространственном радиусе, а для событий — также во временном окне вокруг момента события;
2. Измерения времен прохождения волн группируются по парам «событие–станция» и добавляются во все узлы сетки, которые одновременно попадают в зону влияния соответствующего события и станции и в нужный временной диапазон;
3. В каждом узле сетки агрегируются все попавшие туда измерения, по ним рассчитываются описательные статистики и, при достаточном количестве данных, параметры линейной регрессии между временами прихода разных волн;

## 2 Применение на примере полуострова Камчатка

Для эксперимента был выбран регион, ограниченный меридианами  $155^\circ$ ,  $167^\circ$  и параллелями  $48^\circ$ ,  $60^\circ$  (рис. 1). Данные о землетрясениях, станциях и временах приходов волн были взяты в открытом справочнике ISC (рис. 4, 6).

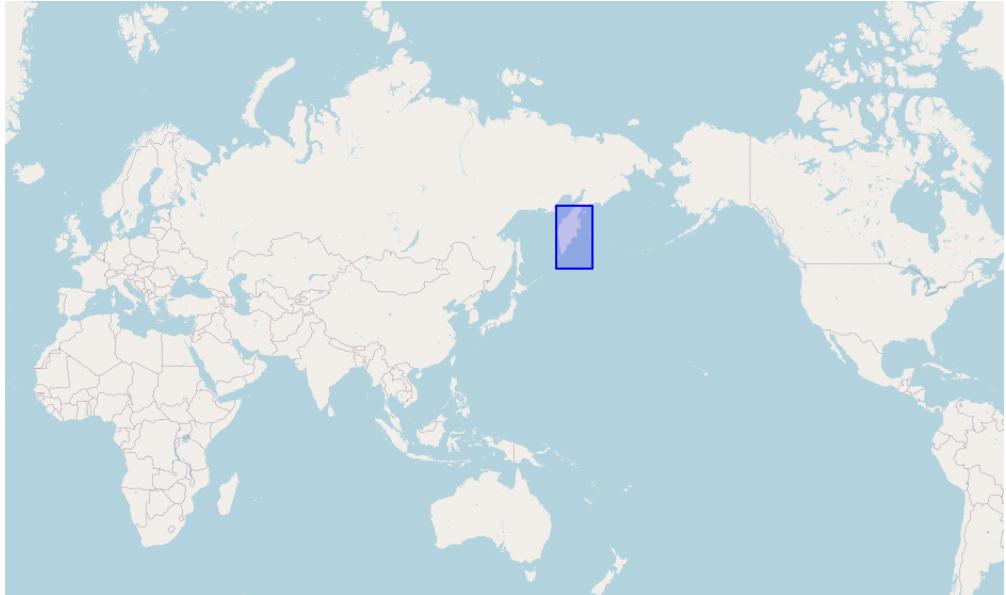


Рис. 1: Исследуемый регион — полуостров Камчатка (синяя рамка)

В исследуемом регионе была выявлена значительная неоднородность данных. Начиная с 2007 года количество фиксируемых событий резко уменьшается, меняется доминирующий тип уверенности в событии (рис. 3).

Анализ распределения магнитуд позволил найти наиболее вероятную причину расхождения: после 2006 года перестали поставляться данные о событиях магнитуды меньше 3.5 (рис. 2). Для дальнейших расчетов использовались данные за 2007–2022 годы.

magyear	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
1,0	25	401	204	2	4	3	2									1					1			
1,5	27	3445	3908	50	47	68	43	1								5	1	1	1		2	3	6	2
2,0	26	2388	2956	372	480	643	410	4	7	10	31	34	50	69	44	32	28	32	77	60	39	29	21	
2,5	13	504	815	1400	1631	1745	1179	40	42	68	121	182	212	309	217	204	128	92	214	229	124	111	95	
3,0	71	257	1480	2106	1826	1656	1023	145	210	417	376	429	475	620	461	414	293	275	391	434	296	267	235	
3,5	72	666	1417	1990	1607	1344	1235	1060	1175	1423	1413	1426	1452	2237	1511	1605	1266	1271	2113	2025	1616	1232	1133	
4,0	120	1075	1098	1854	1206	1119	1358	1033	1087	1199	1410	1403	1345	2301	1188	1203	913	1045	1733	1797	1386	1113	988	
4,5	117	697	648	1074	710	617	756	687	626	530	697	699	749	1359	593	662	481	621	966	1088	741	733	603	
5,0	84	286	248	377	261	278	284	228	257	304	303	326	450	769	280	256	203	296	588	541	339	377	347	
5,5	18	60	106	116	125	79	104	49	94	73	94	65	173	315	106	94	69	80	285	113	114	113	104	
6,0	2	46	40	32	48	12	59	12	34	24	25	20	67	156	30	29	20	10	131	52	38	9	30	
6,5		21	8	19	14	1	15	7	1		14	1	18	67	3	9	27	13	52	37	18	21	3	
7,0		3		5	3		3				2		1	10			10	6	29	3	7	17		
7,5																2		14						
8,0																			3					

Рис. 2: Сводная таблица с распределением зафиксированных магнитуд по годам, красная рамка — вероятная причина неоднородности данных

События из справочника ISC с разбивкой по типу уверенности, полуостров Камчатка, 2000–2022 г.г.

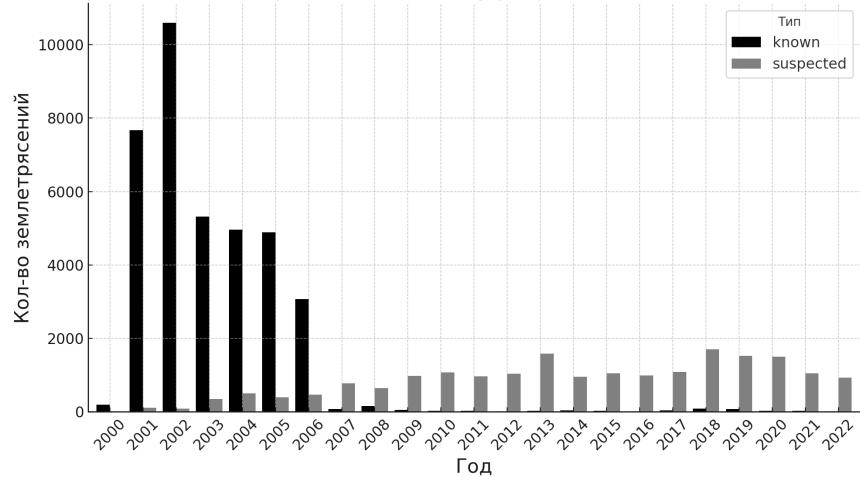


Рис. 3: События из справочника ISC с разбивкой по типу уверенности, полуостров Камчатка, 2000–2022 гг.

Параметры сетки, использованные в эксперименте:  $n_{\text{lat}} = 135$ ,  $n_{\text{lon}} = 180$ ,  $n_{\text{periods}} = 192$ . Значения эффективных радиусов:  $R_e = 70$  км,  $R_s = 200$  км. Данный набор параметров выбран из общих соображений.

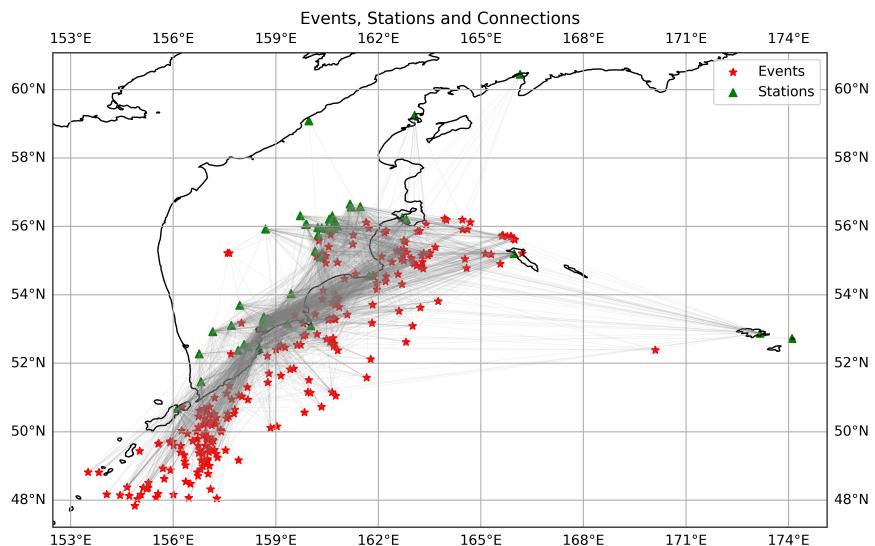


Рис. 4: Землетрясения (красные звездочки), станции (зеленые треугольники) и фиксации волн (серые линии) за январь 2010 года

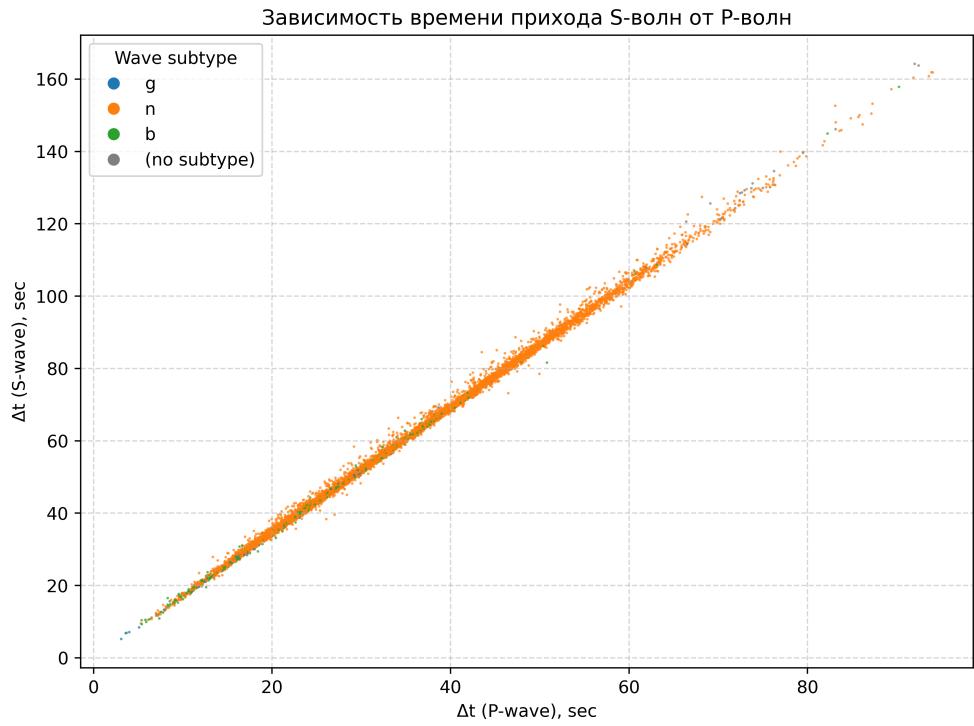


Рис. 5: Зависимость времен прихода S-волн от времен прихода P-волн за период 01.01.2007 — 01.05.2008, использованные для расчета одного из узлов. Цвет точки обозначает основную среду распространения волн: *g* - верхняя кора, *b* - нижняя кора, *n* - верхняя мантия, no subtype - ниже верхней мантии

Из графика 5 видно, что точки действительно ложатся на прямую.

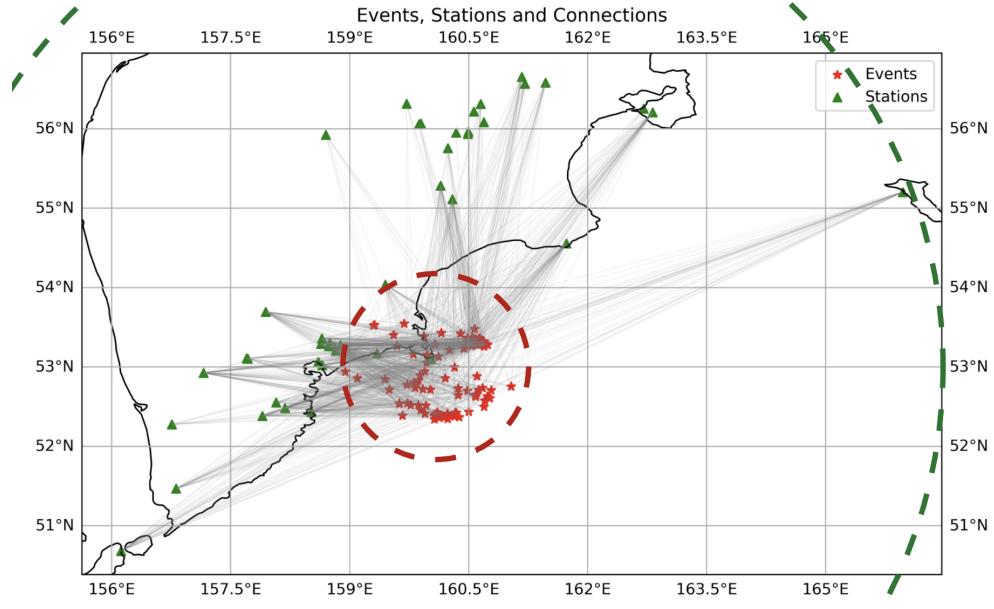


Рис. 6: Землетрясения (красные звездочки), станции (зеленые треугольники) и фиксации волн (серые линии) за период 01.01.2007 — 01.05.2008, использованные для тестового расчета одного из узлов. Красная и зеленая окружности — радиусы  $R_e = 70$  км и  $R_s = 450$  км соответственно

Результаты эксперимента представляются в виде последовательности изображе-

ний полей  $V_p/V_s$ , каждое из которых соответствует конкретному временному узлу сетки (рис. 7). Для получения непрерывного поля применяются методы интерполяции, в частности линейная интерполяция.

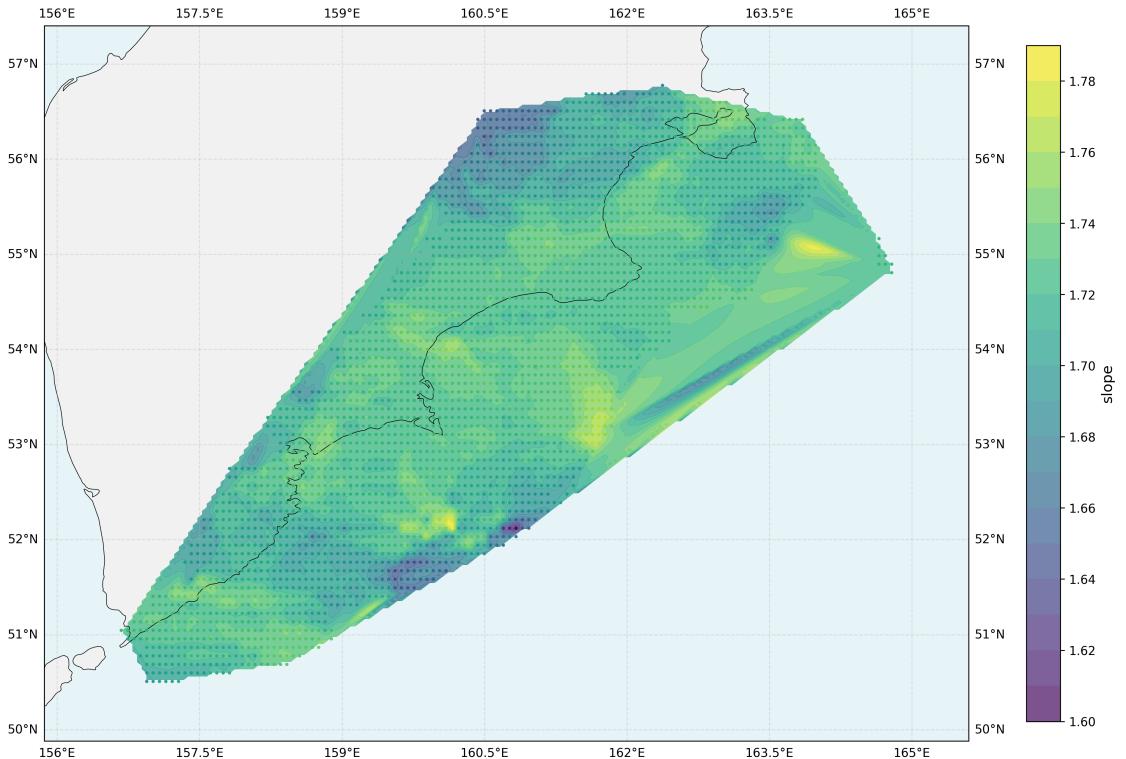


Рис. 7: Пространственное распределение  $V_p/V_s$  для одного из временных узлов сетки (величина показана цветом, пространственные узлы показаны точками). Размер временного окна 150 суток.

## Выводы

Предложенный алгоритм позволяет оценивать пространственно-временные вариации отношения  $V_p/V_s$  на основе данных о временах прихода сейсмических волн. Среднее значение поля составляет  $\sim 1.5 - 1.8$ , что согласуется с результатами, полученными другими исследователями [1]. В дальнейшем алгоритм может быть использован для расширения набора признаков с целью улучшения качества прогноза землетрясений.

## Список литературы

- [1] MS Kuchai and LB Slavina. The vp/vs kinematic parameter in the southern segment of the kamchatka seismic subduction zone during the precursory period of the march 25, 2020, mw= 7.5 earthquake and its aftershock process. *Journal of Volcanology and Seismology*, 16(5):365–376, 2022.
- [2] Egor Podoliako. egor. <https://github.com/podoliako/egor>, 2025. GitHub repository, accessed 2026-01-18.
- [3] K Wadati and S Oki. On the travel time of earthquake waves.(part ii). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 11(1):14–28, 1933.