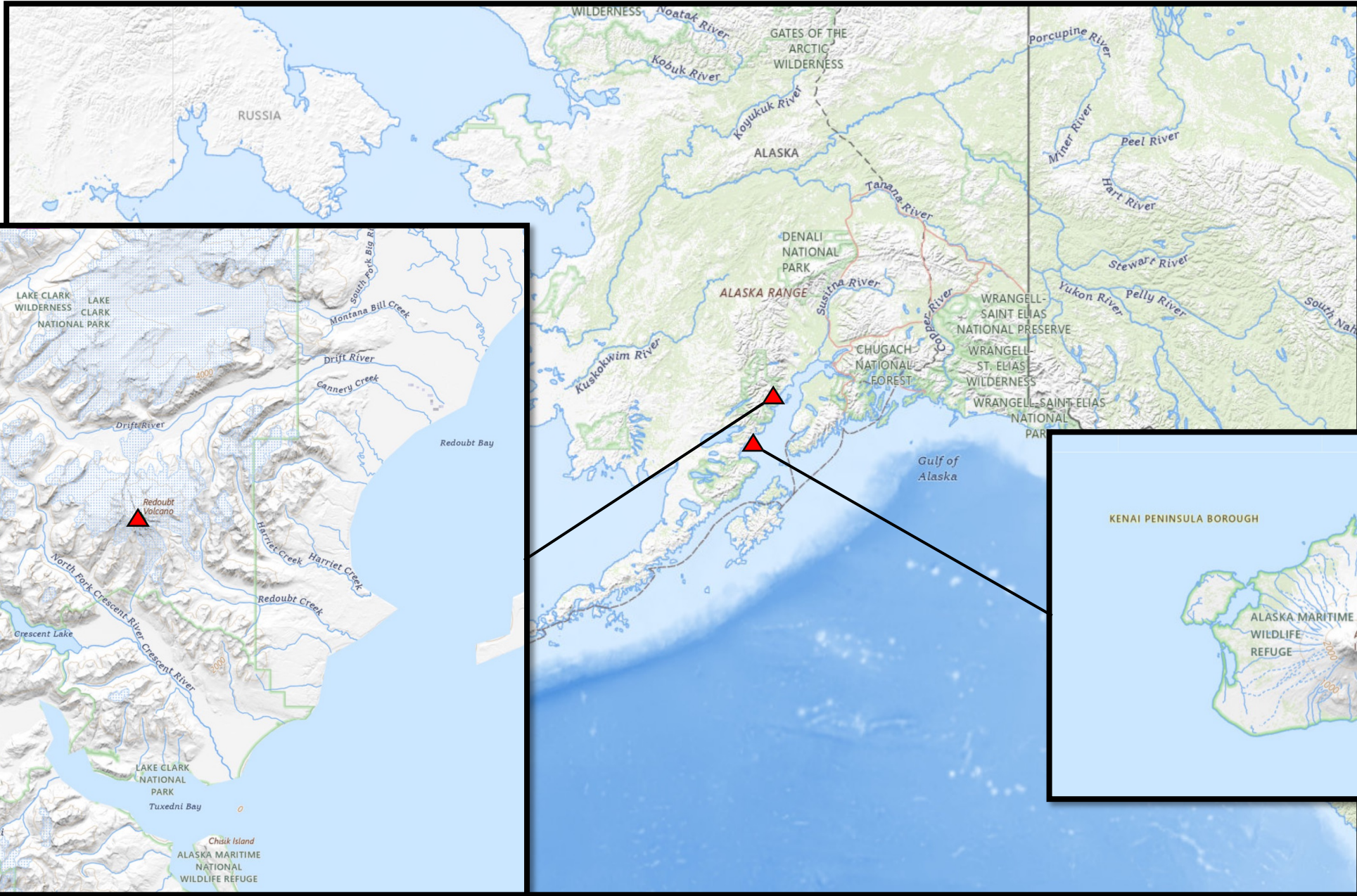


Анализ группирования землетрясений в процессе интрузий перед извержениями вулканов Августина и Редаут

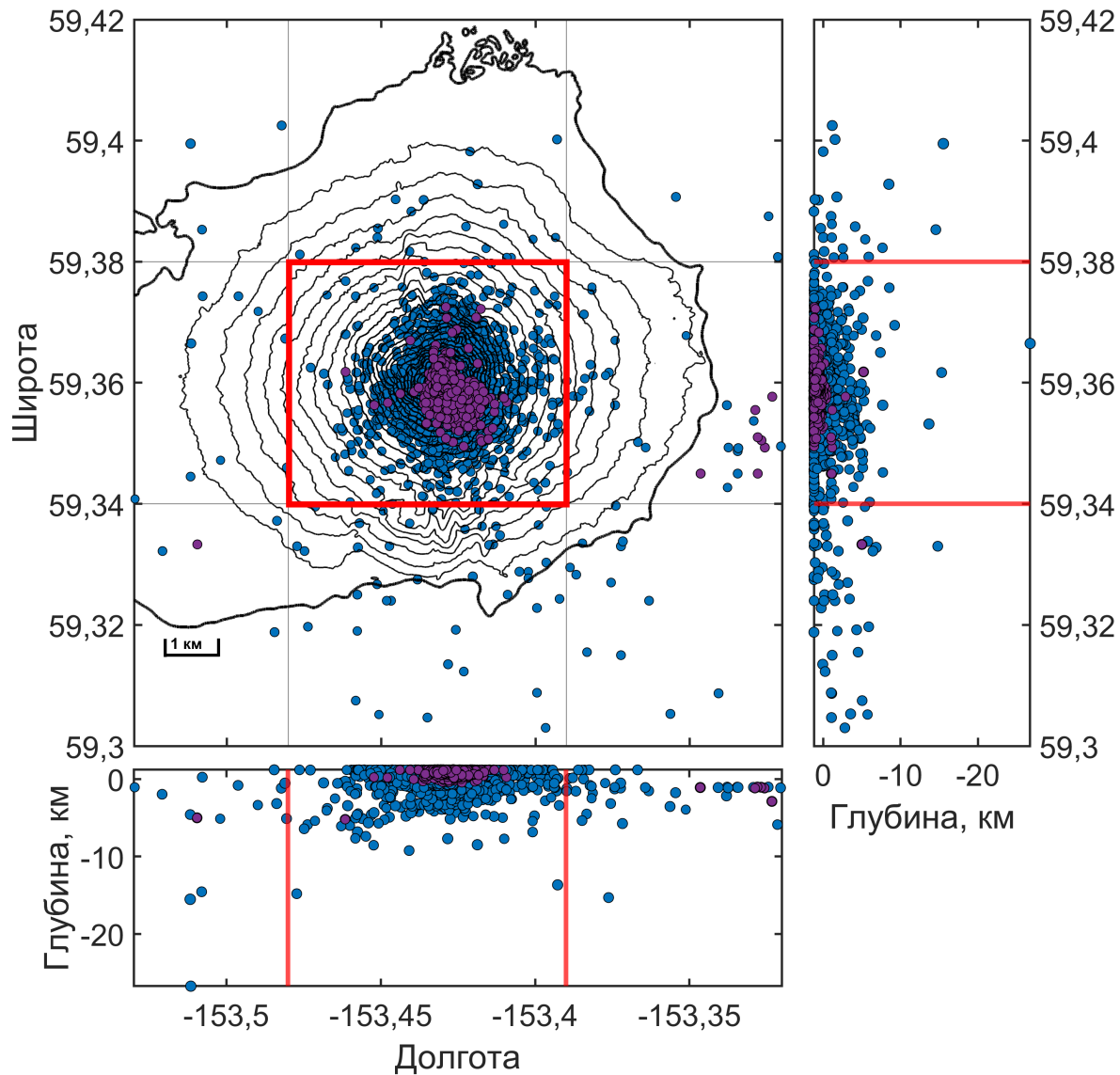
Автор: Греков Евгений Михайлович
мл.н.с. ИТПЗ РАН

*Работа выполнена за счёт средств гранта
Российского научного фонда №25-17-00094 «Создание
методики расчета зависящей от времени
сейсмической опасности».*

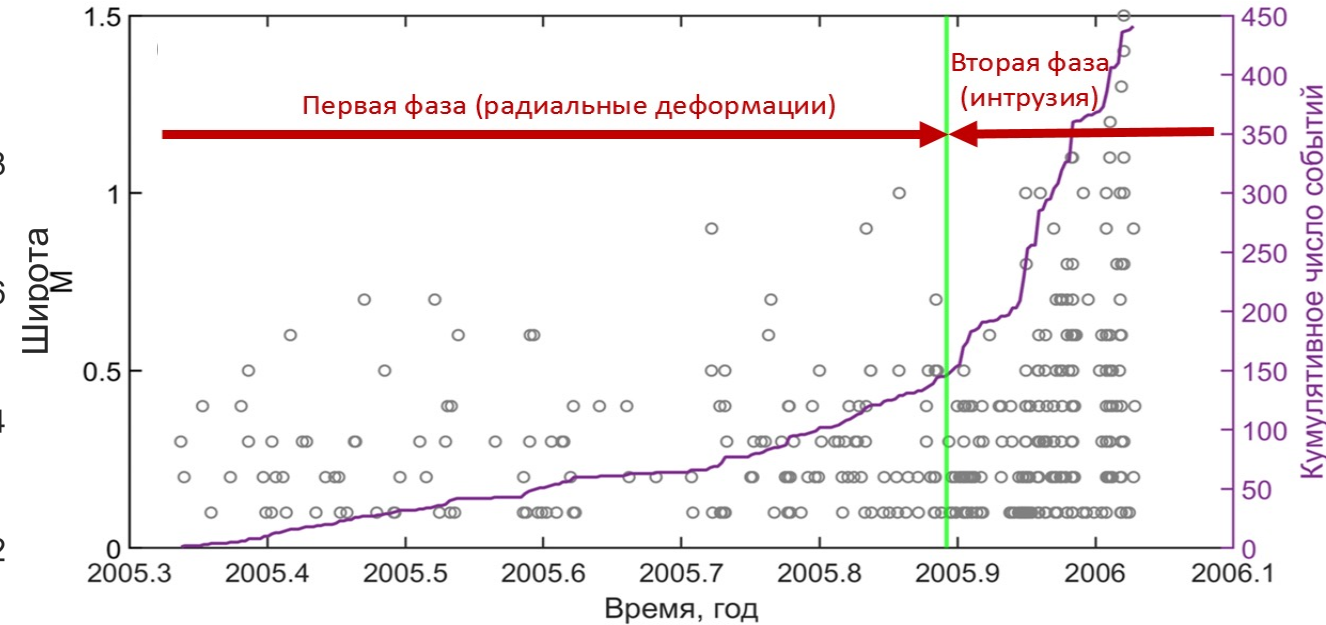
Местоположение вулканов



Вулкан Августина

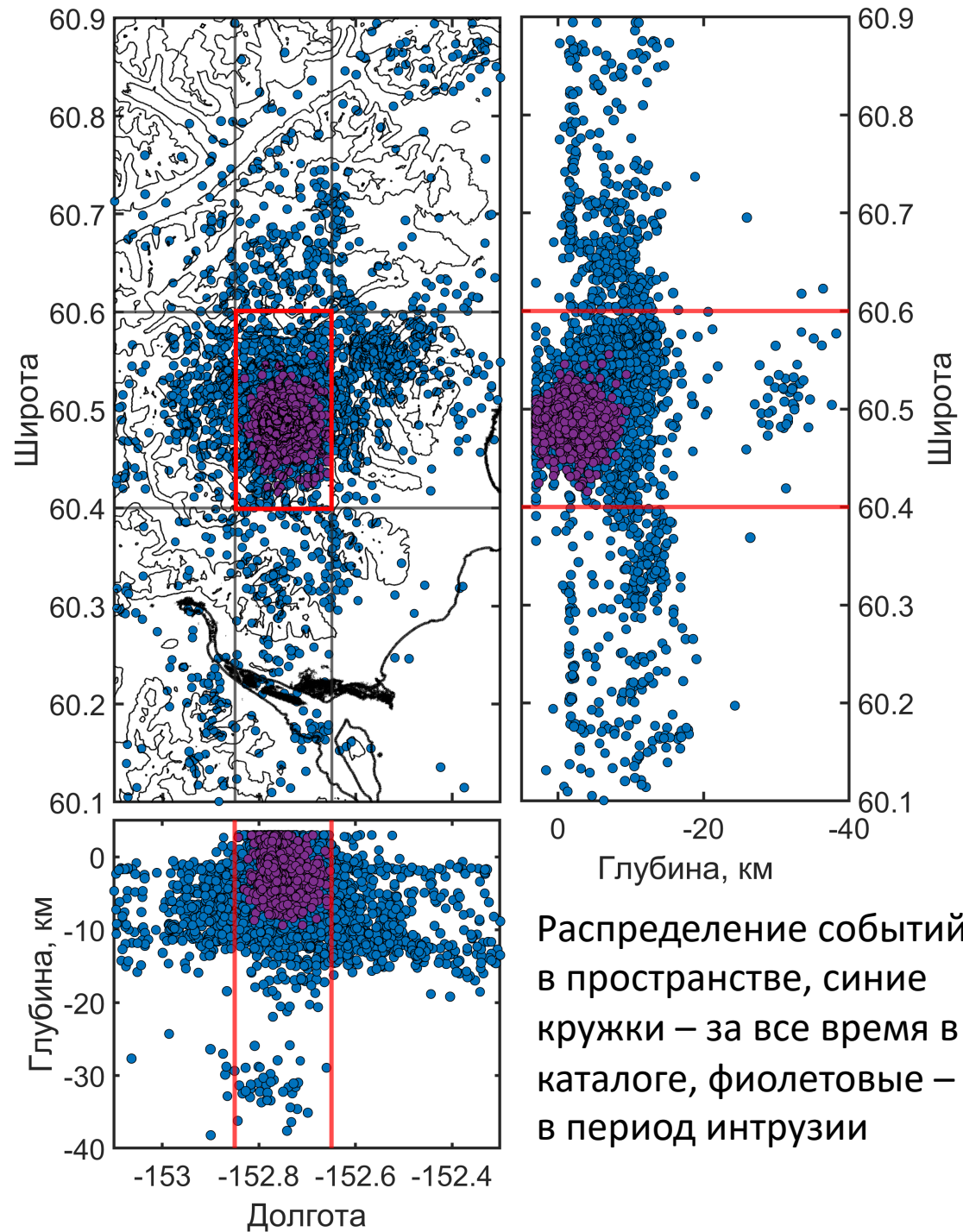


Распределение событий в пространстве, синие кружки – за все время в каталоге, фиолетовые – в период интрузии



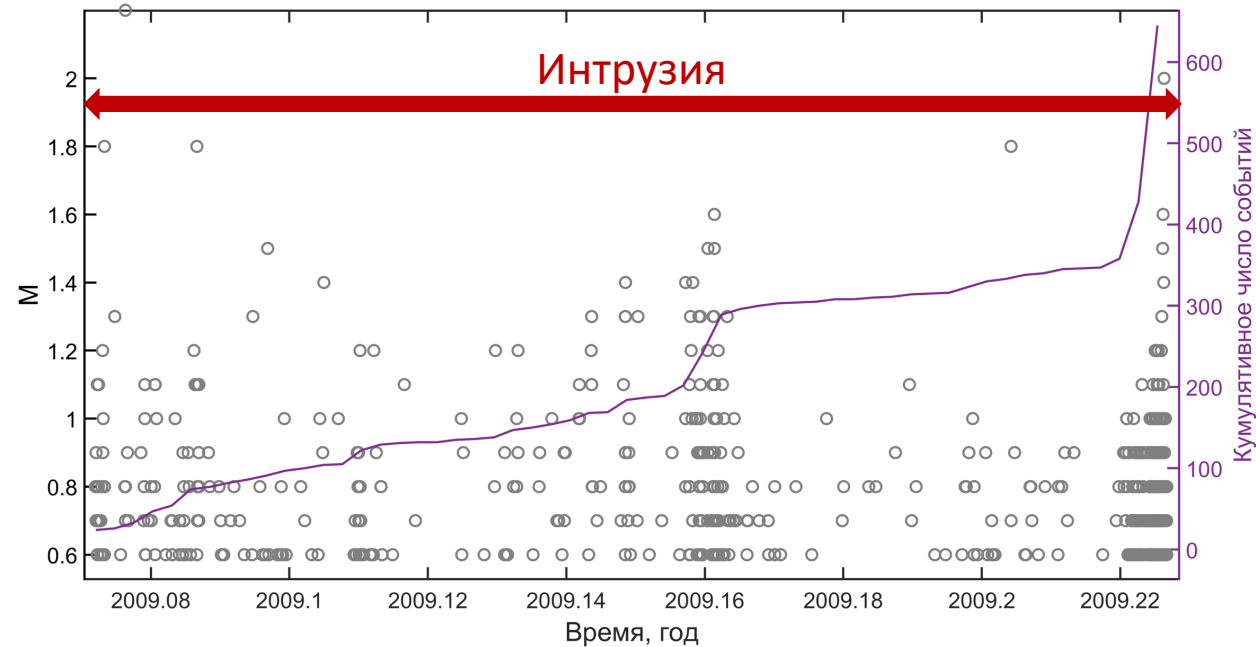
Распределение событий выше порога представительности во времени для исследуемого участка. Кружки – землетрясения, фиолетовая линия – кумулятивное число событий. Вертикальная линия соответствует дате 21.11.2005, разделяющей две фазы. Стадии по деформациям выделены в [Cervelli et al., 2006]

Используются данные сейсмического каталога вулканической обсерватории Аляски [Power et al., 2019]. Доступно по ссылке: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20195037>



Распределение событий в пространстве, синие кружки – за все время в каталоге, фиолетовые – в период интрузии

Вулкан Редаут

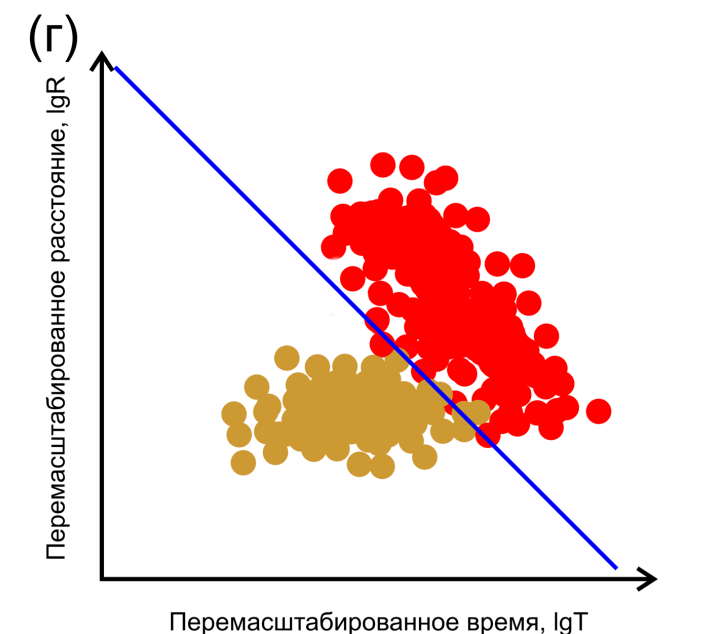
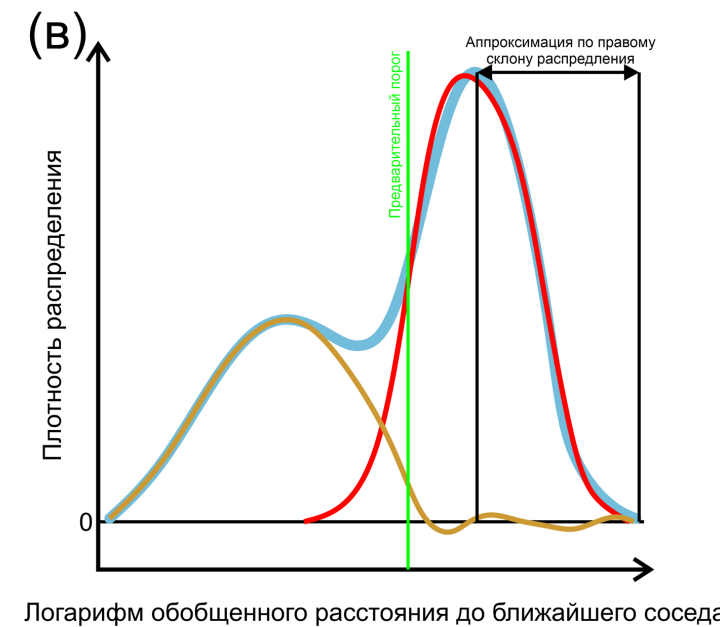
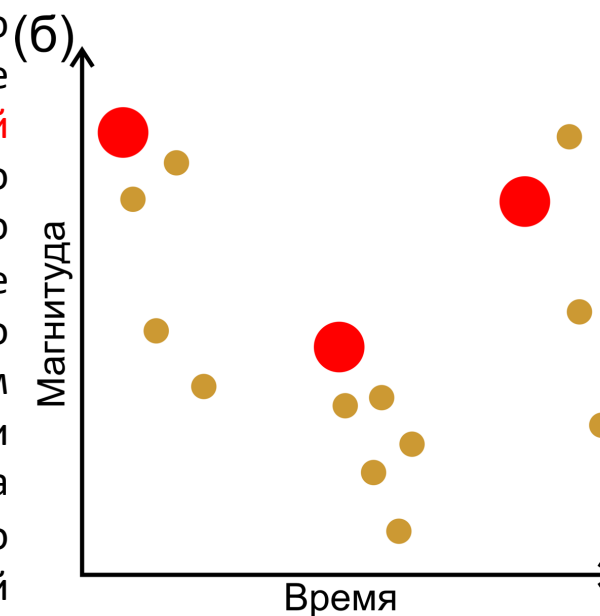
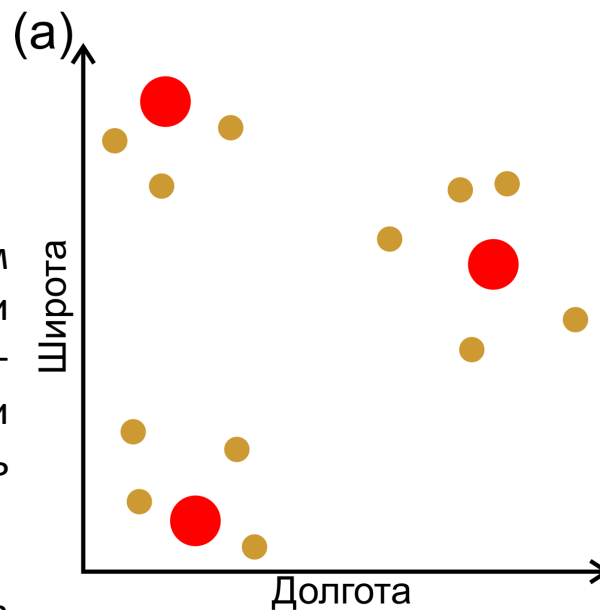


Распределение событий выше порога представительности во времени для исследуемого участка. Кружки – землетрясения, фиолетовая линия – кумулятивное число событий. Первые аномальные деформации поверхности зафиксированы в апреле-мае 2008 года. Период с этого момента до начала извержения связывают с глубинной интрузией под вулканом [Grapethin et al., 2013].

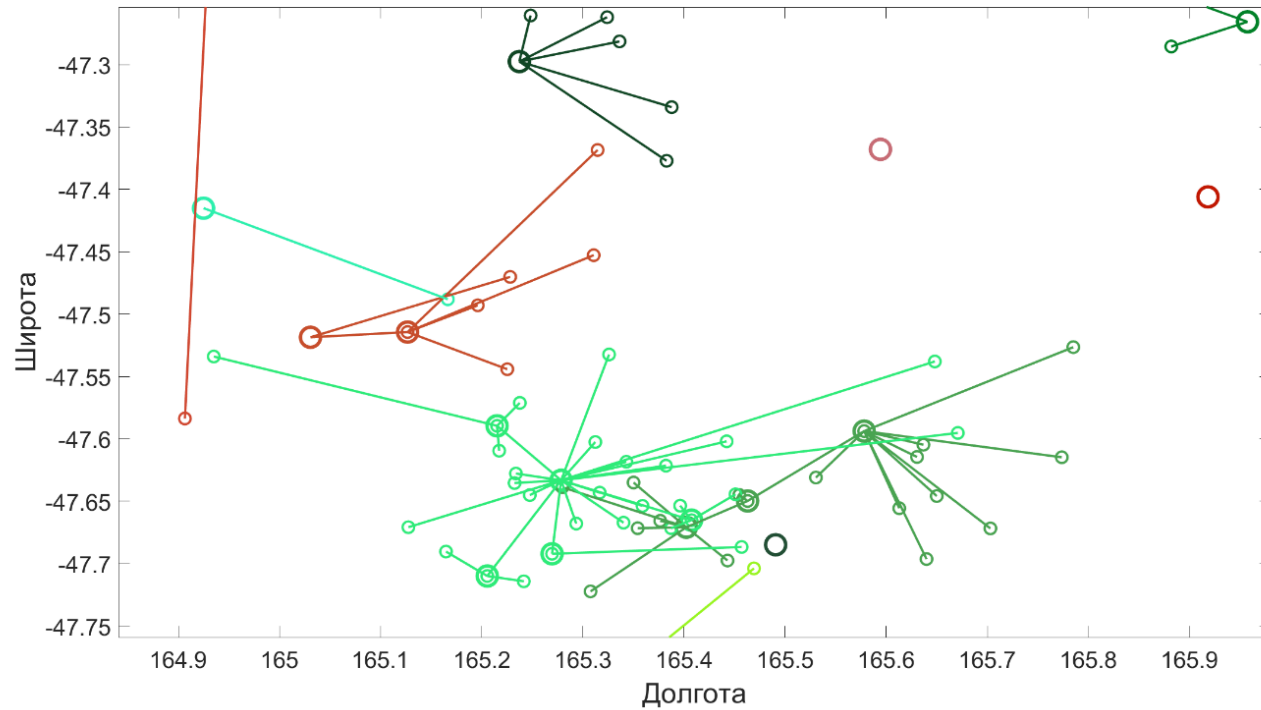
Метод ближайшего соседа

Схематичная иллюстрация декластеризации методом ближайшего соседа. Суть метода заключается во введении метрики в обобщенном пространстве координаты-время-магнитуда, которая позволяет устанавливать уровни статистической связанности между событиями и объединять их в кластеры.

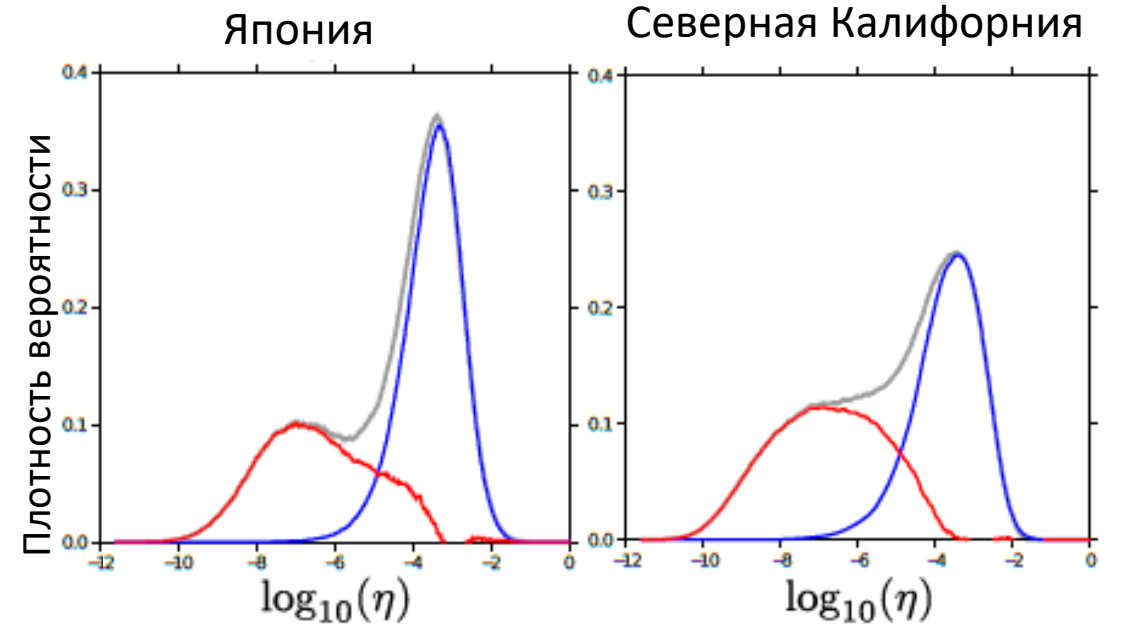
На рисунке справа схематично нарисованы три кластера событий. В каждом кластере ближайшим соседом для любого **желтого события** будет либо **красное событие**, либо другое **желтое** из того же кластера. Но для **красных событий** ближайшим соседом будет **желтое событие** из другого кластера (обратим внимание, что соседом какого-либо события может быть только событие, произошедшее раньше него по времени). Понятно, что обобщенные расстояния до ближайшего соседа для **красных событий** окажутся в среднем больше, чем для **желтых**. Поэтому на распределении обобщенных расстояний до ближайшего соседа эти два класса расстояний сформируют две моды (рис. (в)). Именно такая ситуация обычно наблюдается в тектонической сейсмичности, где события с меньшими обобщенными расстояниями представлены афтершоками.



Методы



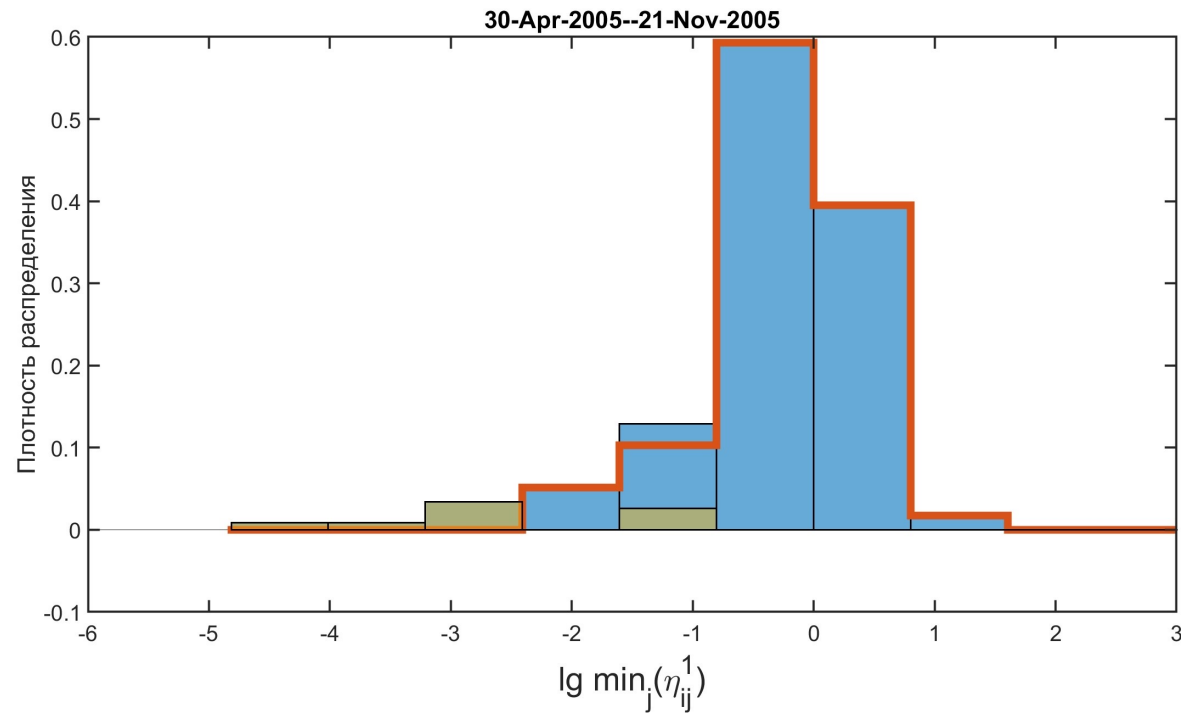
Пример выделенных кластеров из каталога Новой Зеландии. Большие кружки – события-триггеры (мейншоки), маленькие – события-потомки, двойной кружок означает, что событие является одновременно триггером одного события и потомком другого.



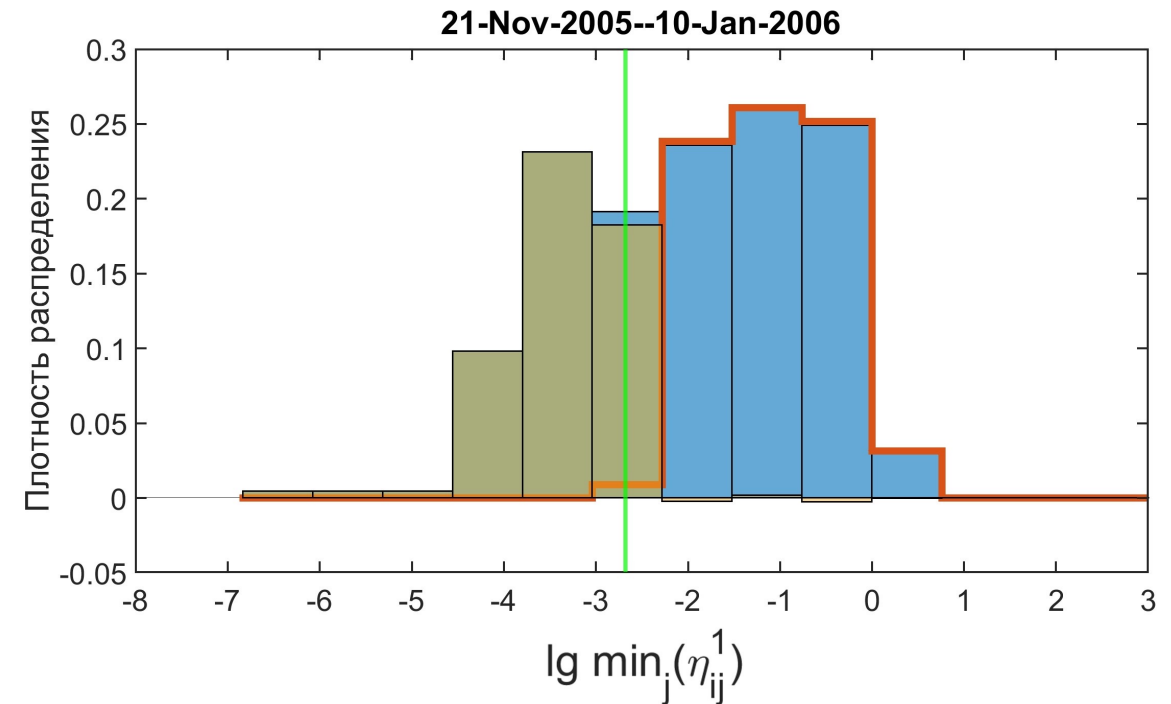
Распределения обобщённых расстояний до ближайшего соседа (η), серая линия – реальное распределение, **синяя линия – фоновый пик**, **красная линия – кластеризованный пик**. Из работы [Shebalin, Narteau, Baranov, 2020]. Метод разработан в [Zaliapin, Ben-Zion, 2013].

Декомпозиция без учета пространственного расстояния для вулкана Августина

$$\eta_{ij}^1 = \begin{cases} t_{ij} 10^{-cm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases}, [Frohlich, Davis, 1990]$$



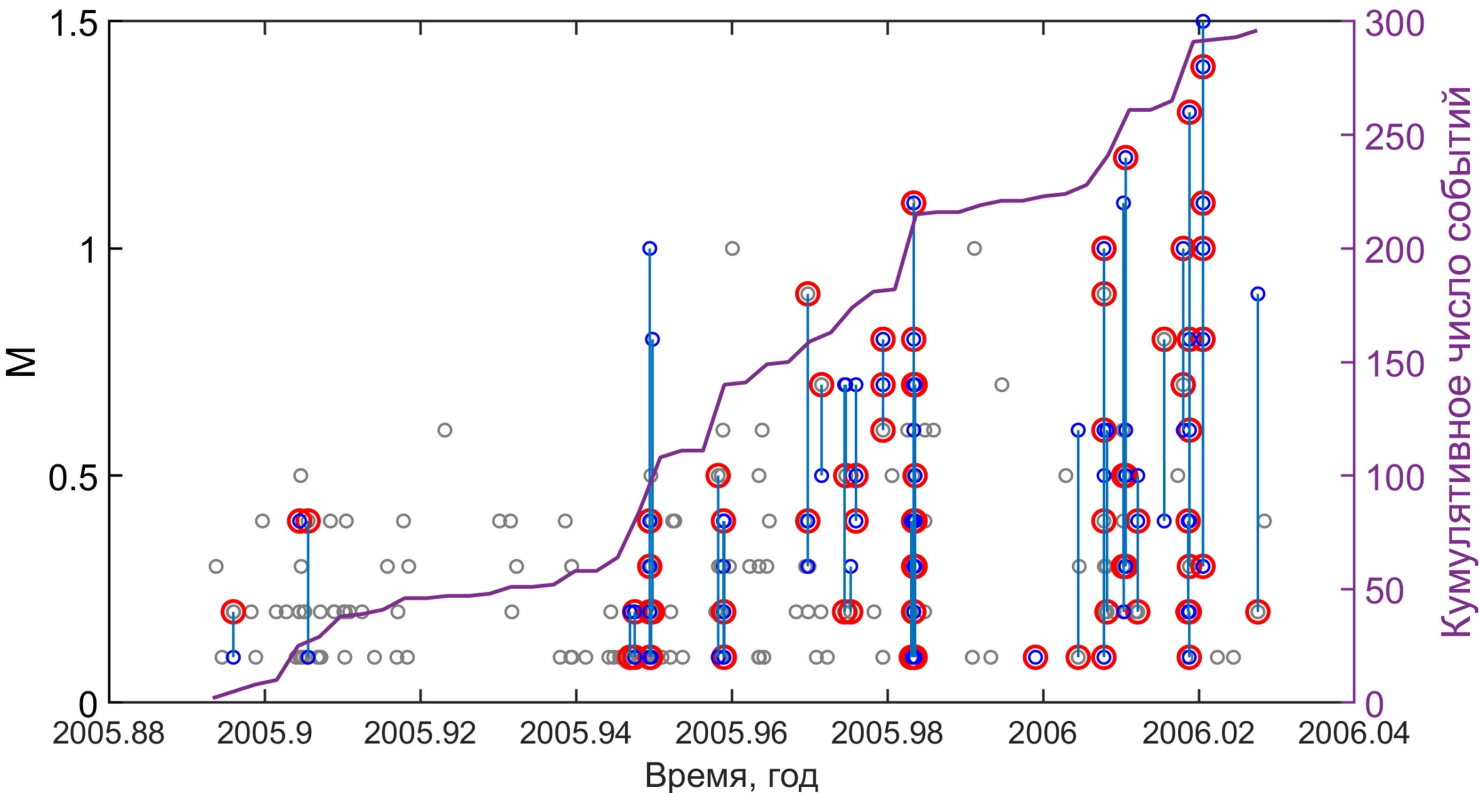
Для первой фазы длинного роя (радиальные деформации)



Для второй фазы (период интрузии)

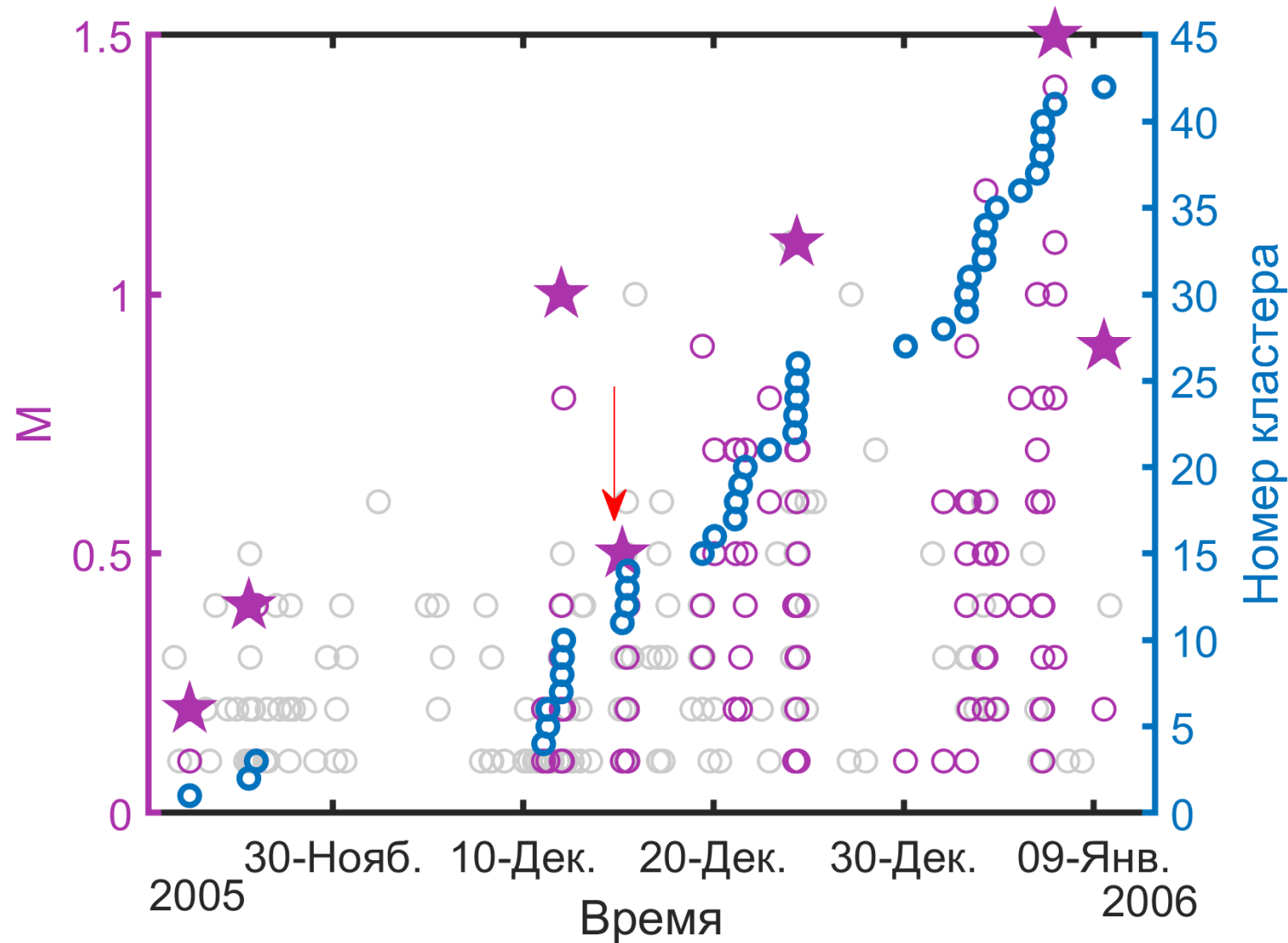
Выделенные кластеры во время интрузии перед извержением вулкана Августина 2006-го года

Серые кружки – независимые события (функция близости относительно ближайшего соседа больше порога), **синие** – связанные события (функция близости меньше порога); **красным** обведены события, у которых есть «потомки» (то есть связанные с ним события); **синими линиями** показаны связи между событиями в кластерах



	b	M_{max}	$\bar{M}$
Первая фаза	1.82	1	0.2766
Вторая фаза	0.99	1.5	0.4401
Кластеризованные			
Вторая фаза	1.91	1.1	0.2726
Несвязанные			

Серии кластеров во время интрузии вулкана Августин



Синие кружки показывают момент времени, когда произошел кластер.

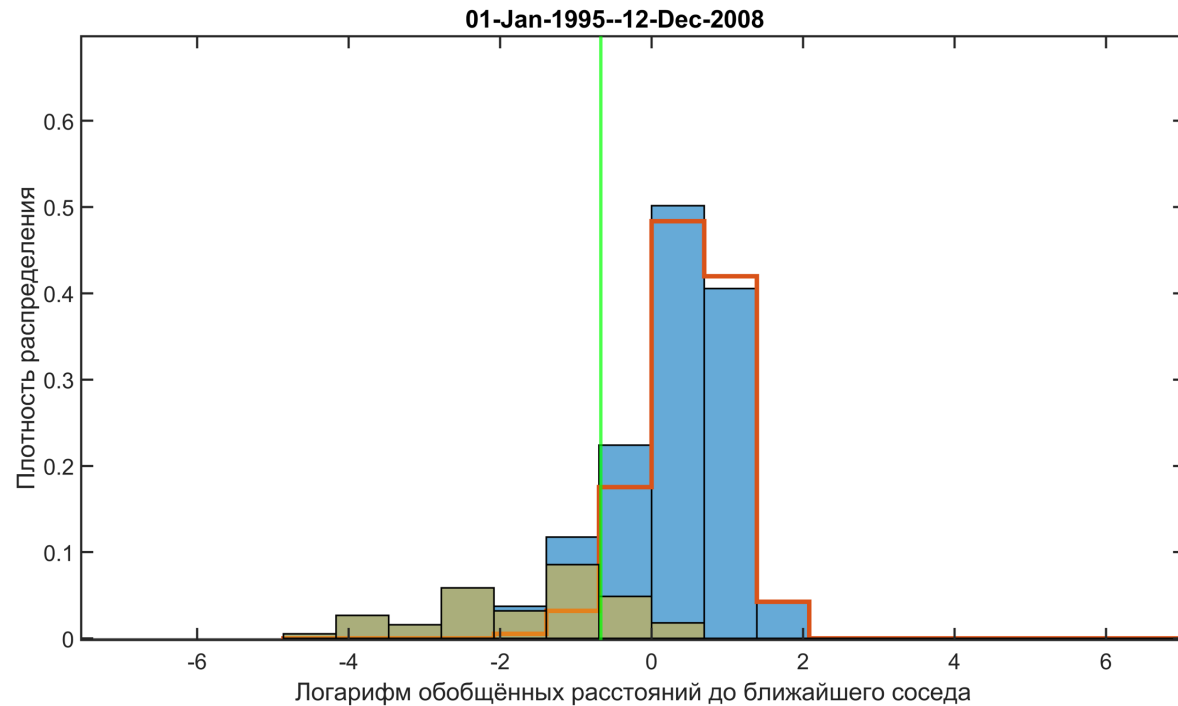
Фиолетовые кружки – события, входящие в кластер, фиолетовые звезды – сильнейшие события в сериях кластеров.

Серые кружки – события, не входящие в кластеры.

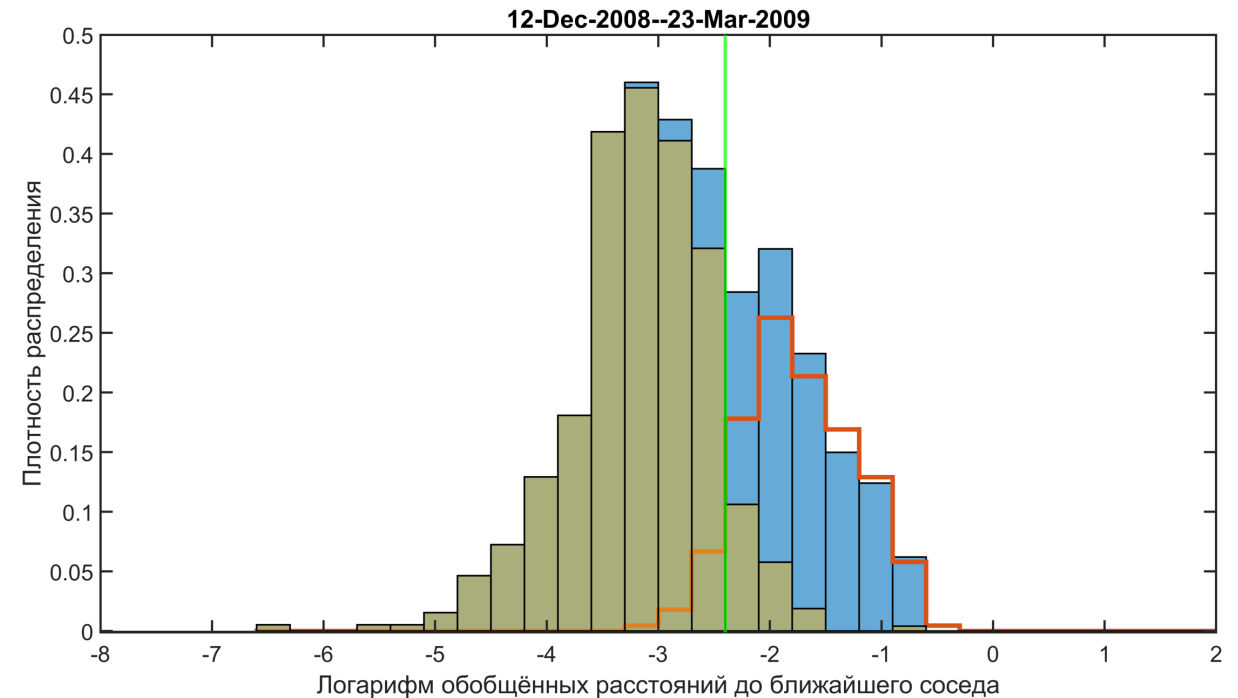
Красной стрелкой отмечена серия, выпадающая из общей закономерности.

Декомпозиция без учета пространственного расстояния для вулкана Редаут

$$\eta_{ij}^1 = \begin{cases} t_{ij} 10^{-cm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases}, [Frohlich, Davis, 1990]$$



Для периода вулканического затишья

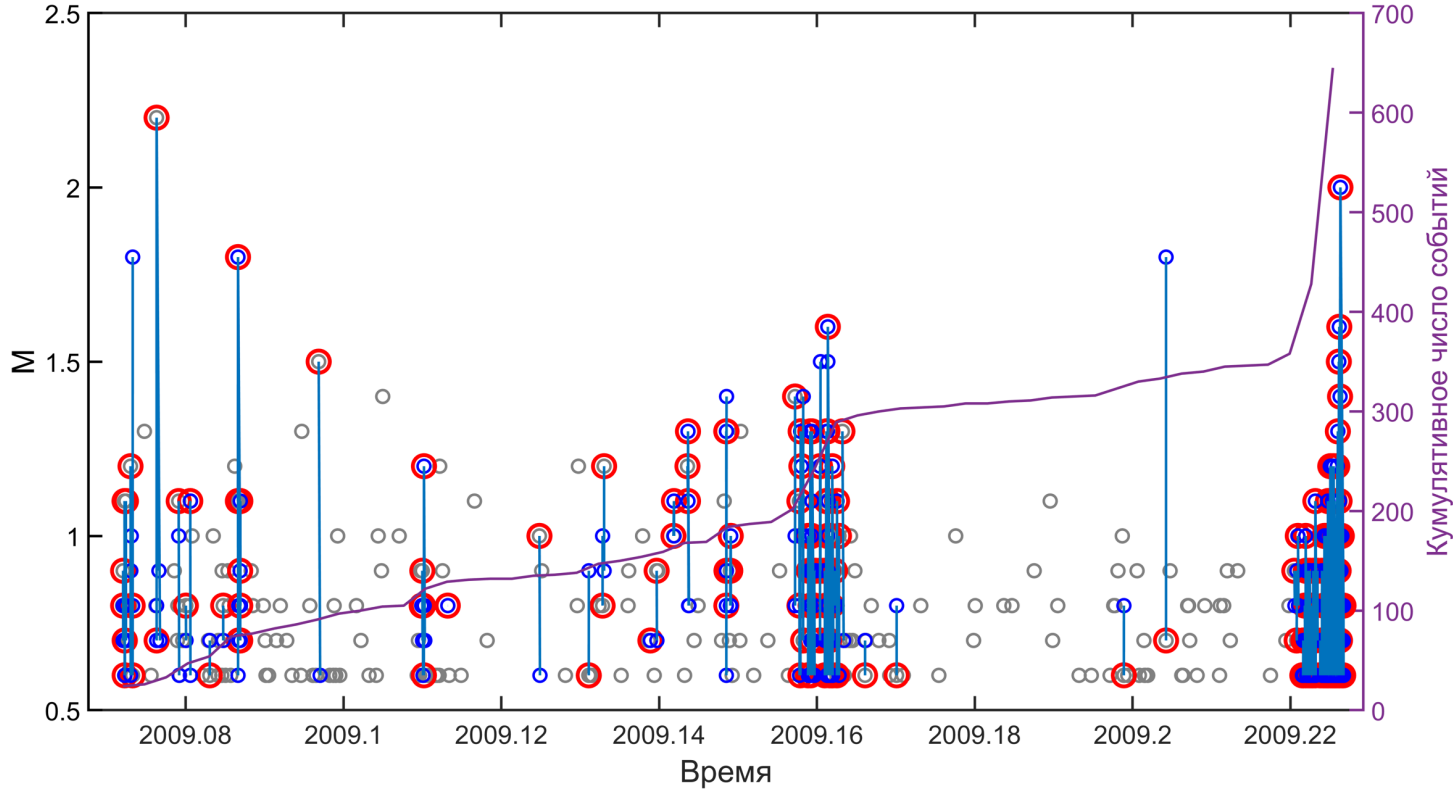


Для периода интрузии

Выделенные кластеры во время интрузии перед извержением вулкана

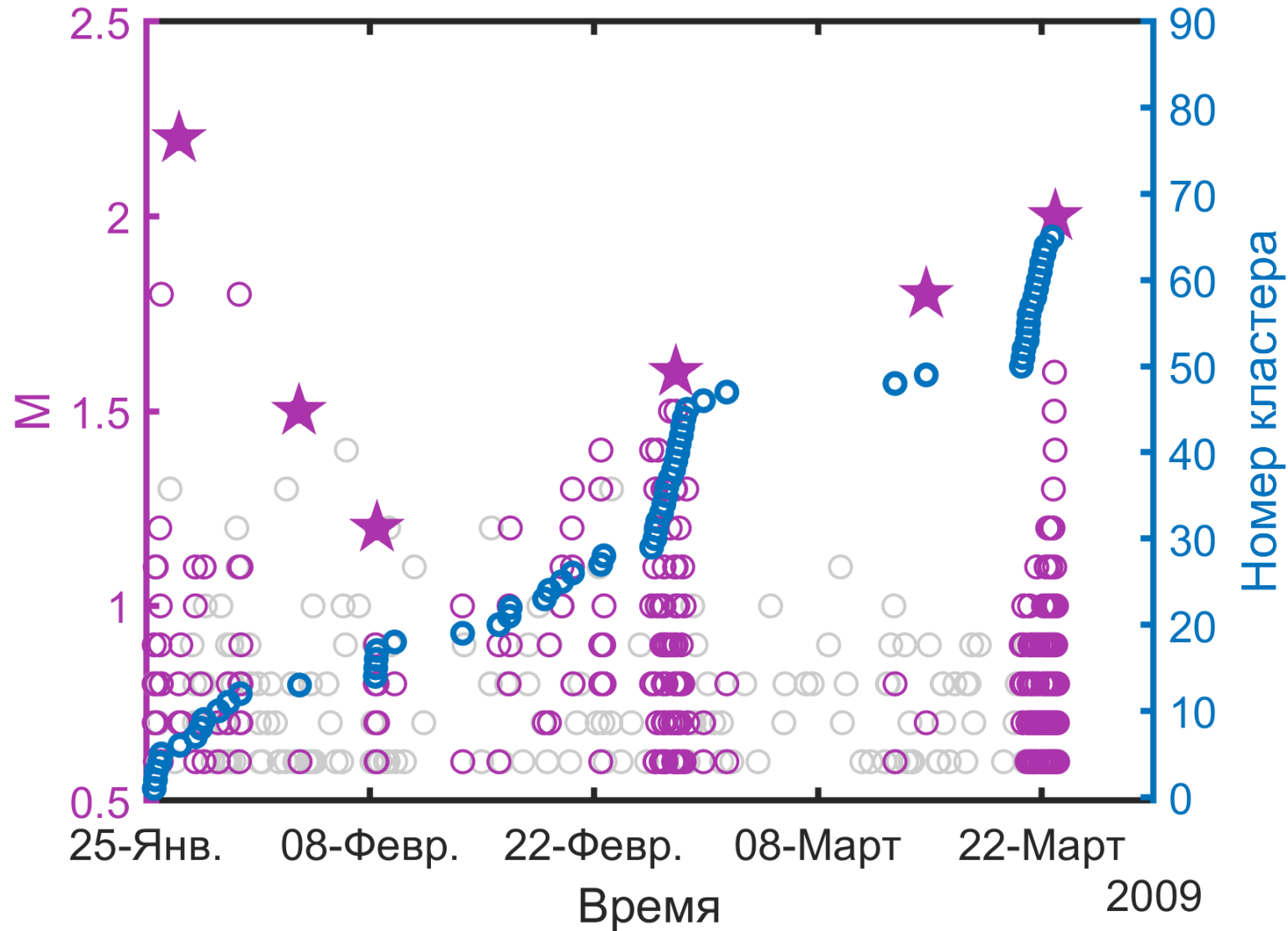
Августина 2006-го года

Серые кружки – независимые события (функция близости относительно ближайшего соседа больше порога), **синие** – связанные события (функция близости меньше порога); **красным** обведены события, у которых есть «потомки» (то есть связанные с ним события); **синими линиями** показаны связи между событиями в кластерах



	b	M_{max}	$\bar{M}$
Период интрузии Кластеризованные	1.767	2.2	0.7975
Период интрузии Несвязанные	1.984	1.4	0.7577

Серии кластеров во время интрузии вулкана Редаут



Синие кружки показывают момент времени, когда произошел кластер.

Фиолетовые кружки – события, входящие в кластер, фиолетовые звезды – сильнейшие события в сериях кластеров.

Серые кружки – события, не входящие в кластеры.

Красной стрелкой отмечена серия, выпадающая из общей закономерности.

Выводы

- 1) Режимы сейсмичности, наблюдающиеся во время интрузий перед двумя извержениями, возможно декластеризовать, разделив на две компоненты. Причем режимы сейсмичностей этих двух компонент значительно отличаются по основным параметрам.
- 2) Предположительно, первая компонента связана с откликом на относительно глобальное повышение давления под вулканом (инфляцию магматической камеры), этот режим имеет более высокое значение параметра наклона магнитудно-частотного распределения, относительно низкие магнитуды событий и в нем практически полностью отсутствует кластеризация событий.
- 3) Вторая компонента, видимо, связана с более локальным разрушением горных пород при внедрении магмы в дайку. События в этом режиме имеют более низкое значение параметра наклона магнитудно-частотного распределения, большие магнитуды, а сами также кластеризуются в серии, в большинстве случаев, оканчивающиеся сильнейшим событием с последующим затишьем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1) *Малютин П.А.* Воздействие флюидных режимов на вариации продуктивности землетрясений по данным натурных экспериментов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов // Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24–30 сентября 2023 г. Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 156–162.
- 2) *Zaliapin I., Ben-Zion Y.* Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 2847–2864, DOI: 10.1002/jgrb.50179
- 3) Shebalin, Peter & Narteau, Clement & Baranov, Sergey. (2020). Earthquake productivity law. *Geophysical Journal International*. 222. 1264-1269. 10.1093/gji/ggaa252.
- 4) Baiesi, Marco & Paczuski, Maya. (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Phys. Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*. 69. 066106. 10.1103/PhysRevE.69.066106.
- 5) *Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н.* Продуктивность техногенной сейсмичности // *Физика Земли*. 2020. С. 40-51. DOI: 10.31857/S0002333720030011.
- 6) *Маточкина С.Д., Шебалин П. Н., Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Малютин П. А.* Параметры группирования событий акустической эмиссии в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород // *Физика Земли*. 2024. №5.
- 7) *Cervelli P. F., Fournier T., Freymueller J., Power J. A.* Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska // *Geophysical Research Letters*. 2006. 33. L18304. DOI:10.1029/2006GL027219
Grapethin R., J. Freymueller, A. M. Kaufman, 2013. Geodetic observation during the 2009 eruption at Redoubt volcano, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 259, 115-132
- 8) Zhan, Y., Roman, D. C., Le Mével, H., & Power, J. A. (2022). Earthquakes indicated stress field change during the 2006 unrest of Augustine Volcano, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL097958. <https://doi.org/10.1029/2022GL097958>
- 9) *Power J.A., Friberg P.A., Haney M.M., Parker T., Stihler S.D., Dixon J.P.* A unified catalog of earthquake hypocenters and magnitudes at volcanoes in Alaska—1989 to 2018 // *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*. 2019, 2019–5037, 17 p., DOI: <https://doi.org/10.3133/sir20195037>. Available at: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20195037>
- 10) *Frohlich C., Davis S.D.* Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues // *Geophysical Journal International*. 1990. V. 100. P. 19-32. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb04564.x>

Вулкан Августина

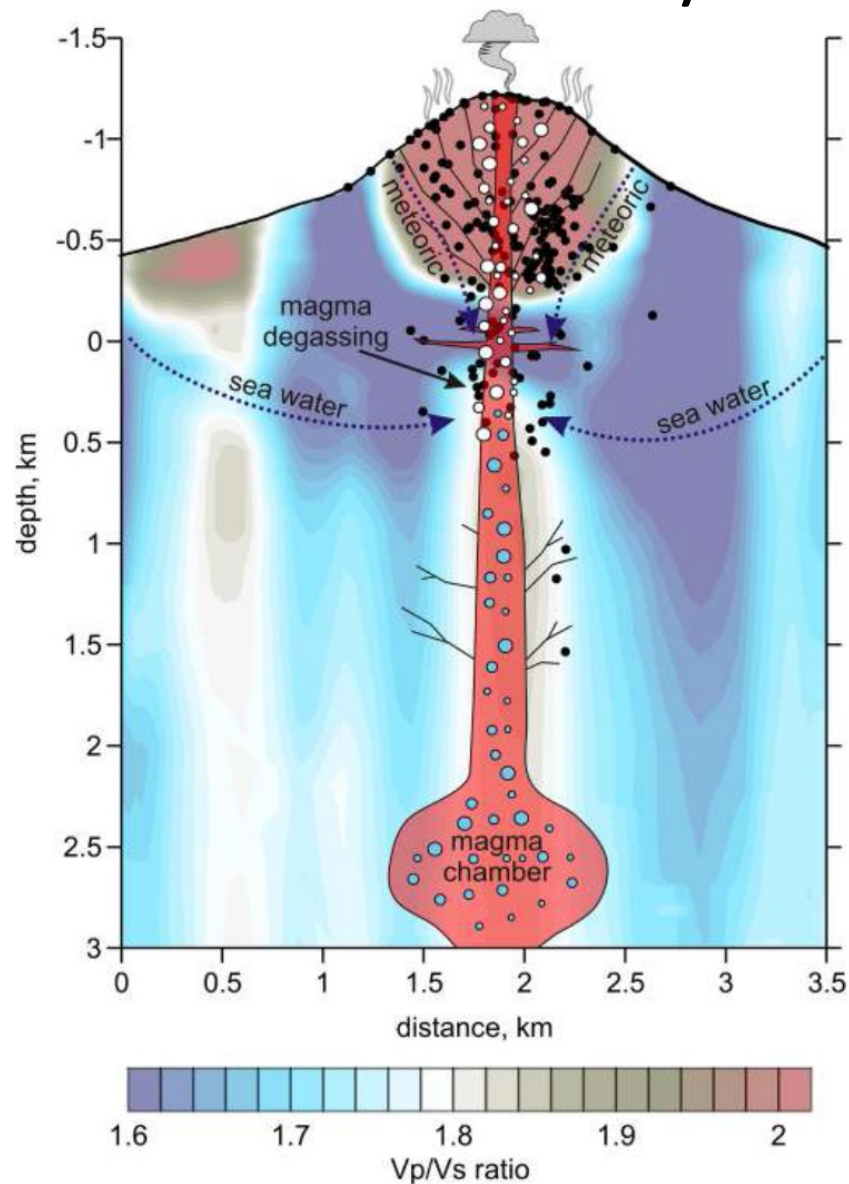
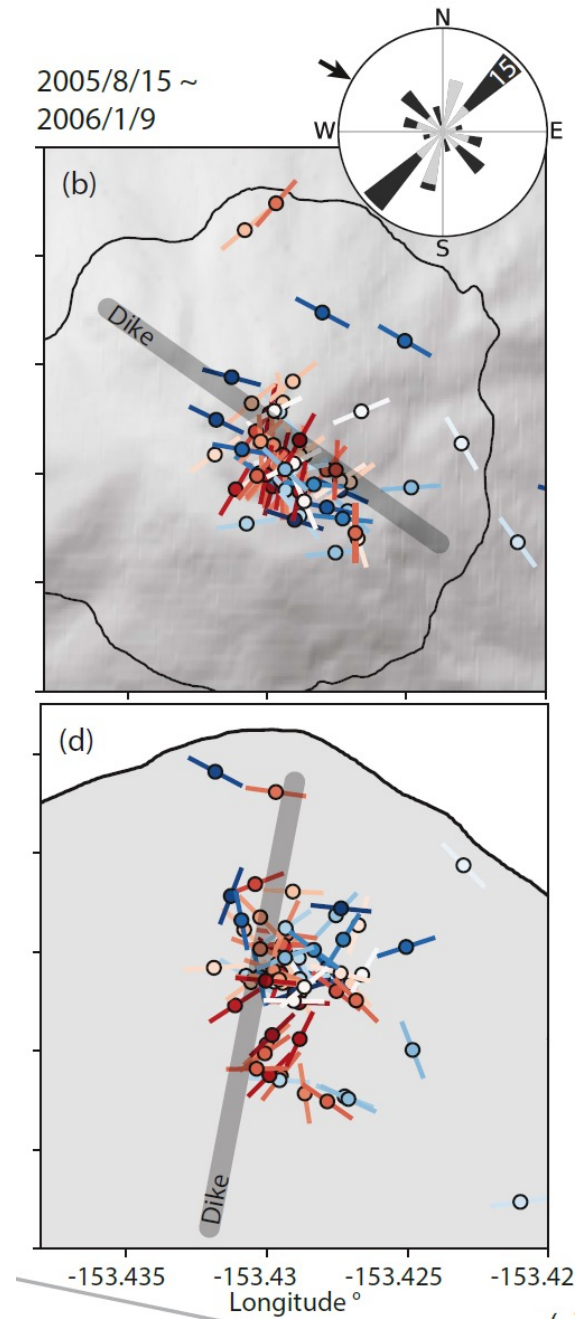
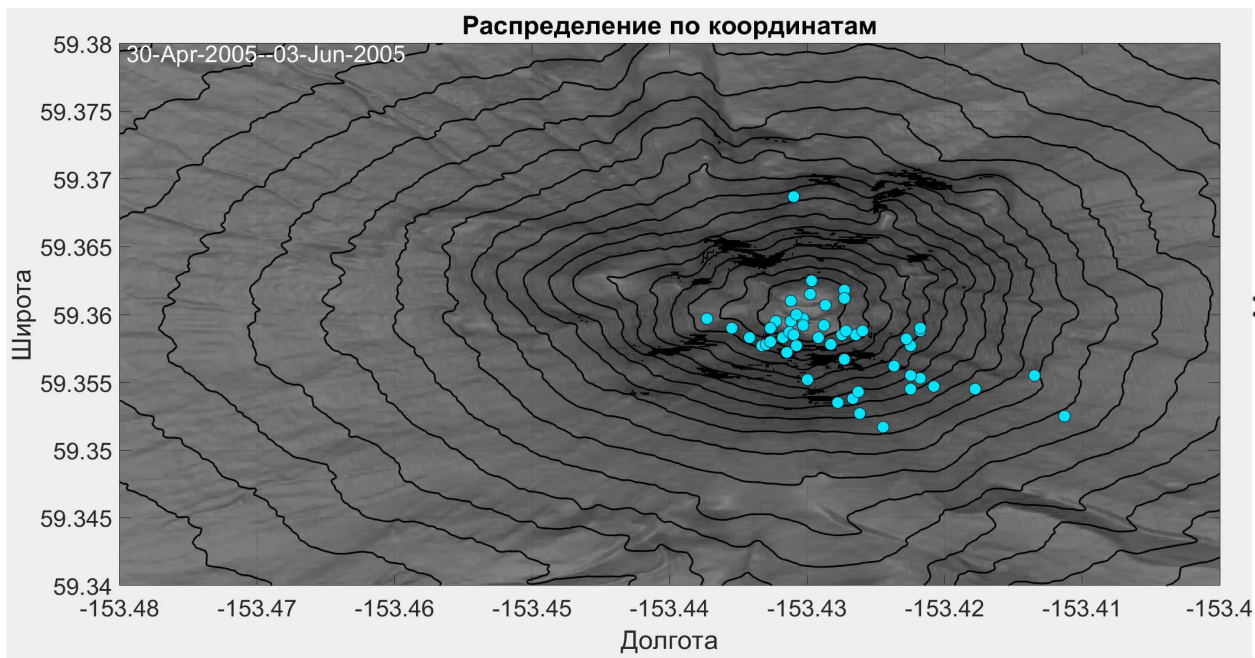


Иллюстрация из [Koulakov et al., 2023].
Схематичное устройство вулкана Августина.

Иллюстрация из [Zhan et al., 2022]. Примерное местоположение дайки во время извержения 2006-го года вулкана Августина

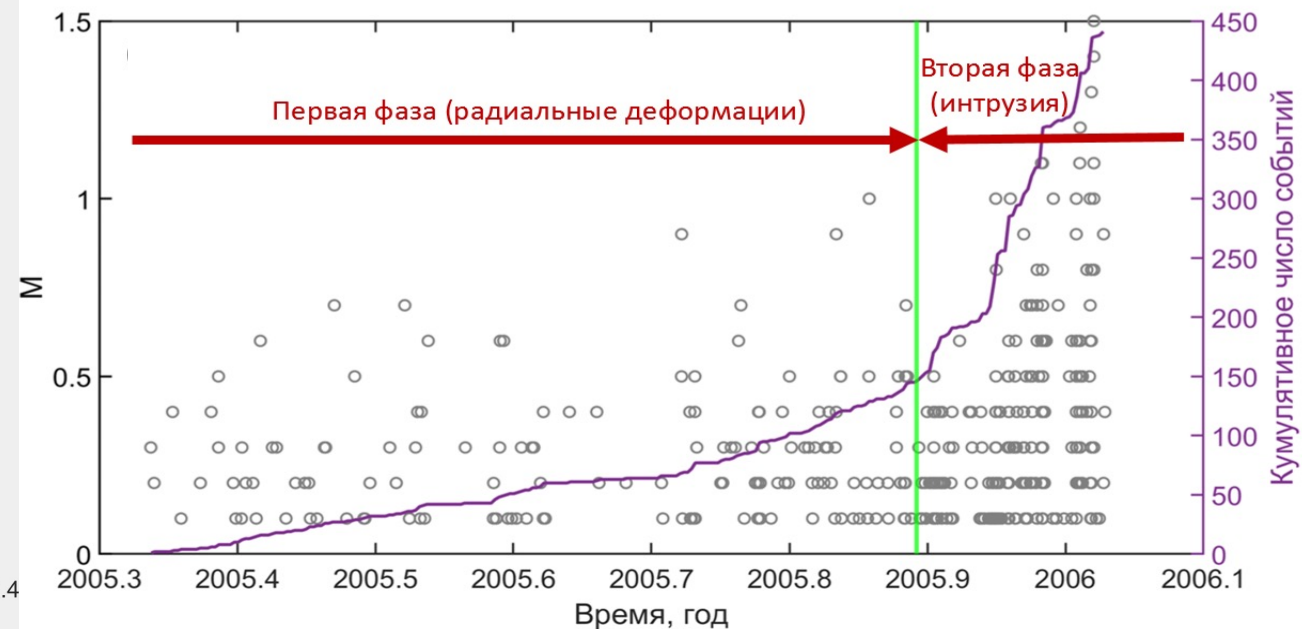


Данные



Анимация распределения событий в пространстве для исследуемого в работе участка. Все события сконцентрированы под вулканической постройкой на глубинах около 5-10 км.

Используются данные сейсмического каталога вулканической обсерватории Аляски [Power et al., 2019]. Доступно по ссылке: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20195037>

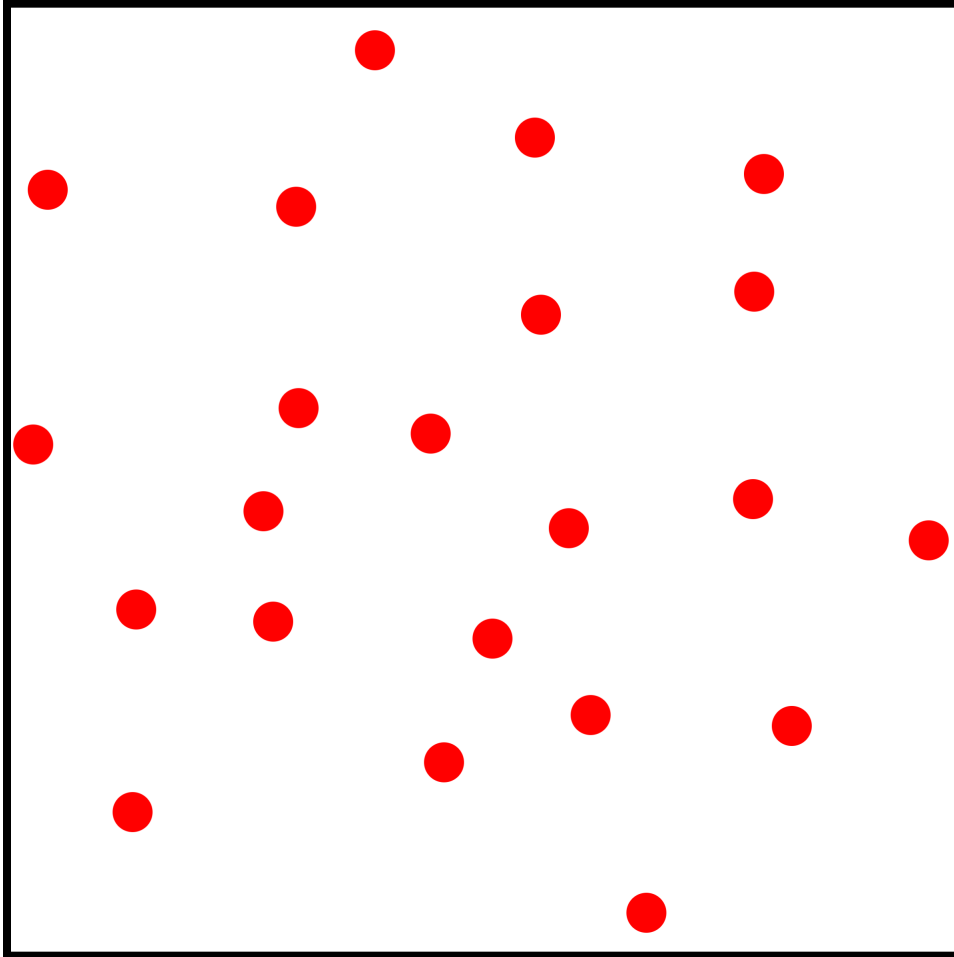


Распределение событий выше порога представительности во времени для исследуемого участка. Кружки – землетрясения, фиолетовая линия – кумулятивное число событий. Вертикальная линия соответствует дате 21.11.2005, разделяющей две фазы длинного роя

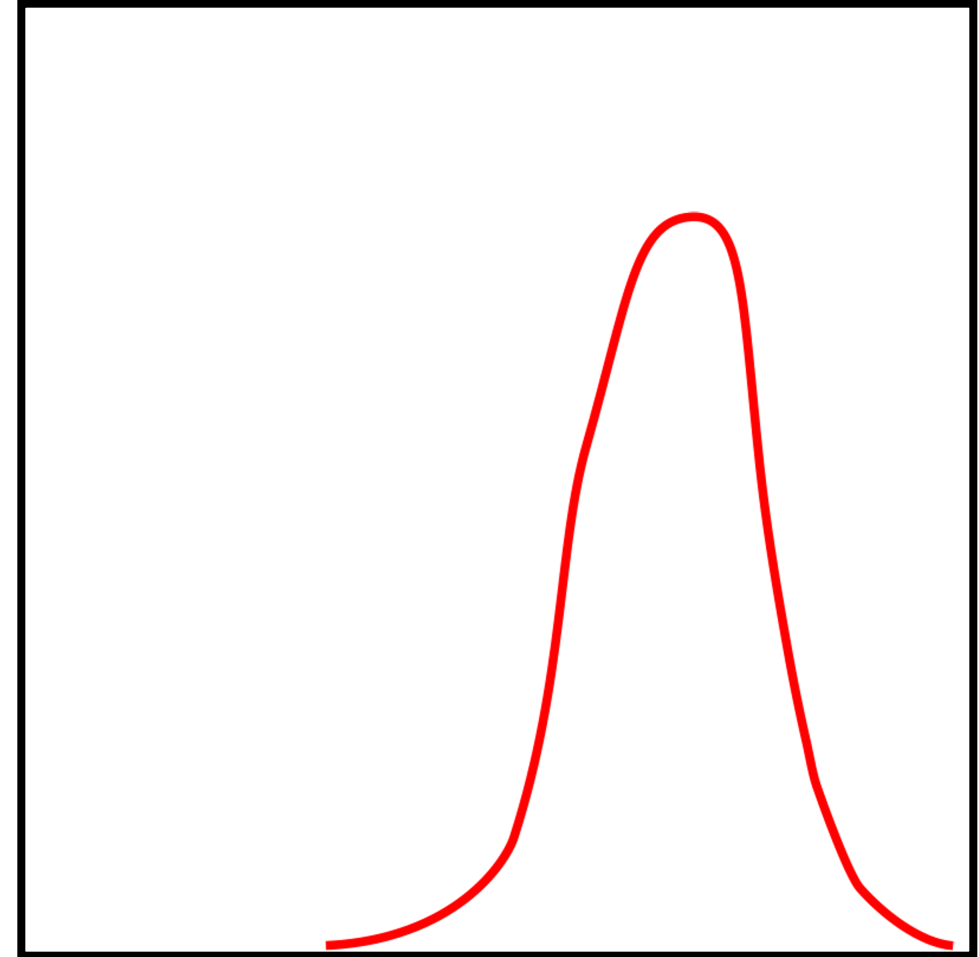
Сейсмические рои были выделены в работе [Jacobs, McNutt, 2010]

Методы

Условное распределение событий в пространстве



Условное распределение обобщенных расстояний до ближайшего соседа



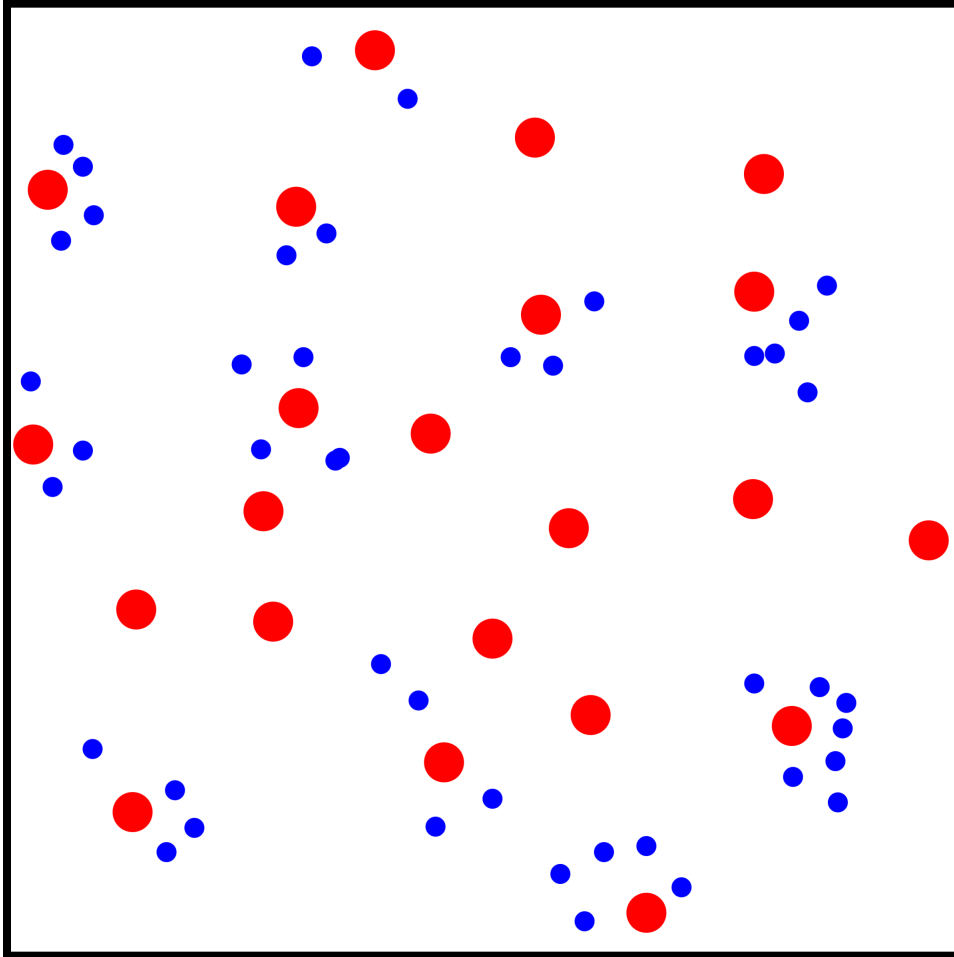
В качестве функции близости выбирается выражение [Baiesi, Paczuski, 2004]:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij} r_{ij}^{df} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases}$$

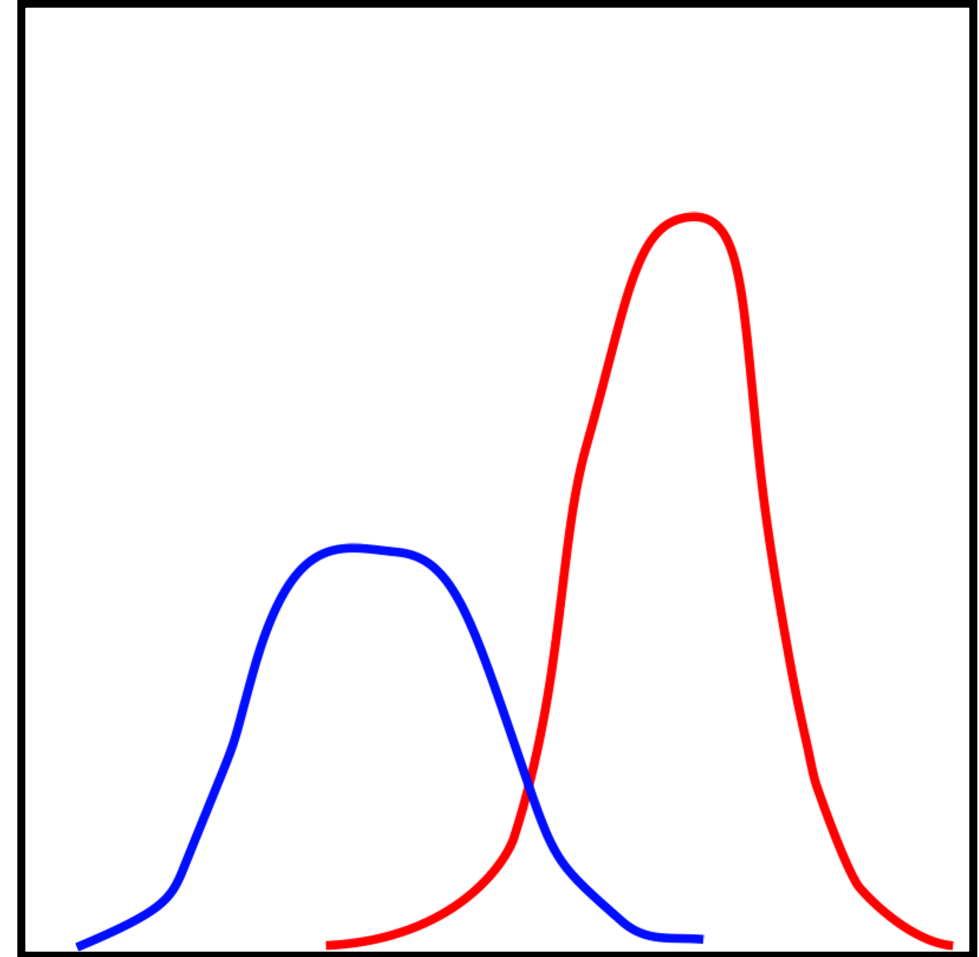
t_{ij} – время между событиями i и j , r_{ij} – пространственное расстояние между ними, m_i – магнитуда события i . b - параметр закона Гутенберга-Рихтера; df – фрактальная размерность распределения гипоцентров или эпицентров землетрясений.

Методы

Условное распределение событий в пространстве



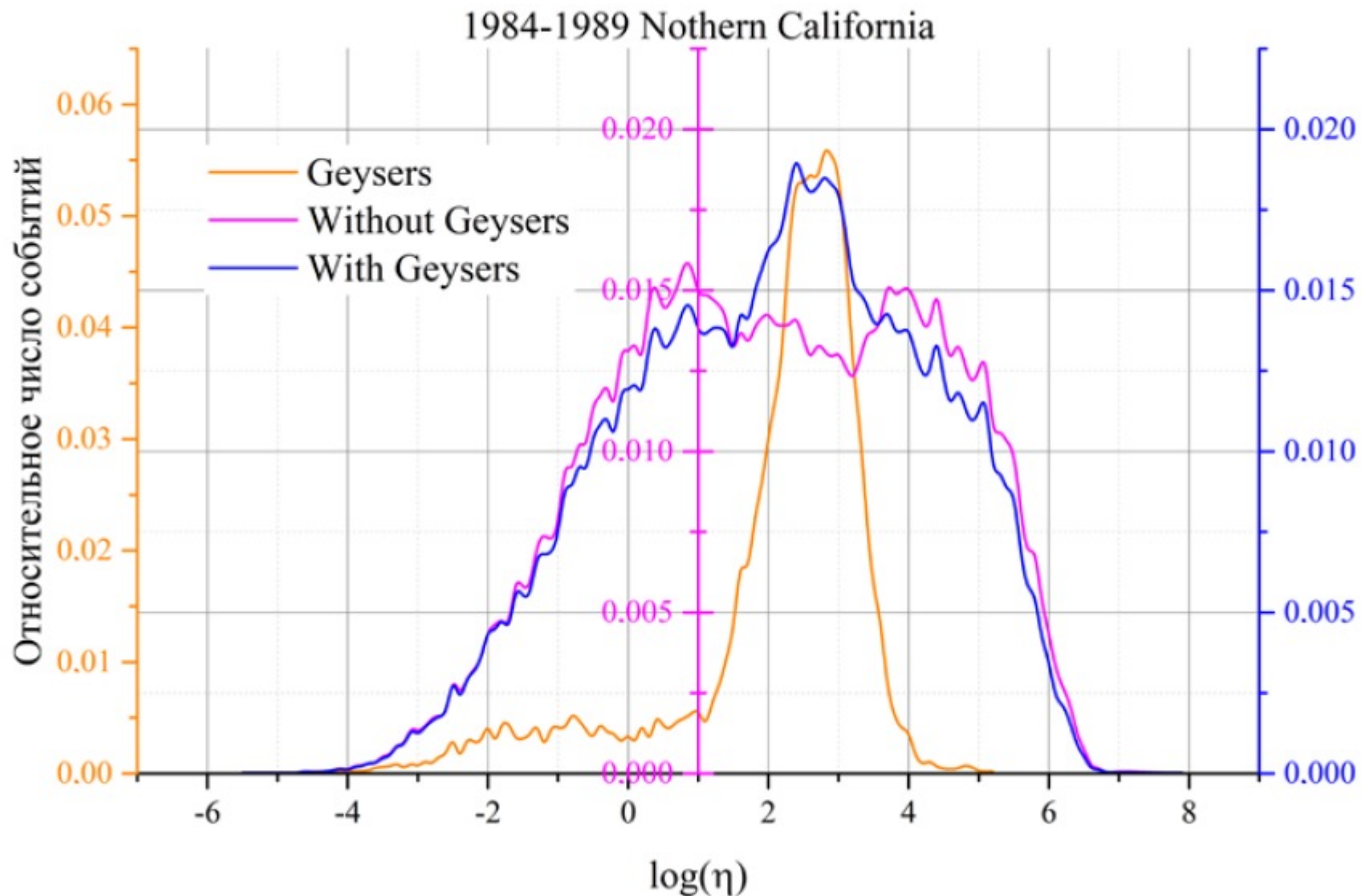
Условное распределение обобщенных расстояний до ближайшего соседа



В качестве функции близости выбирается выражение [Baiesi, Paczuski, 2004]:

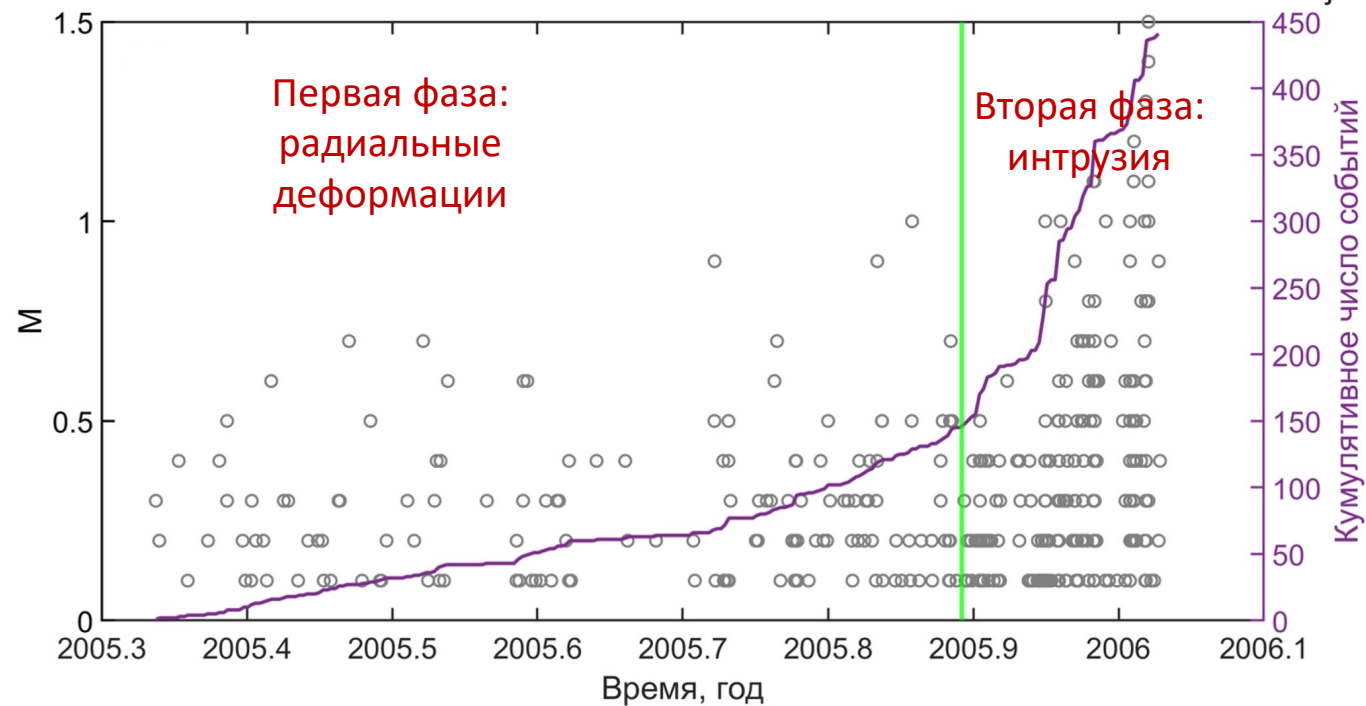
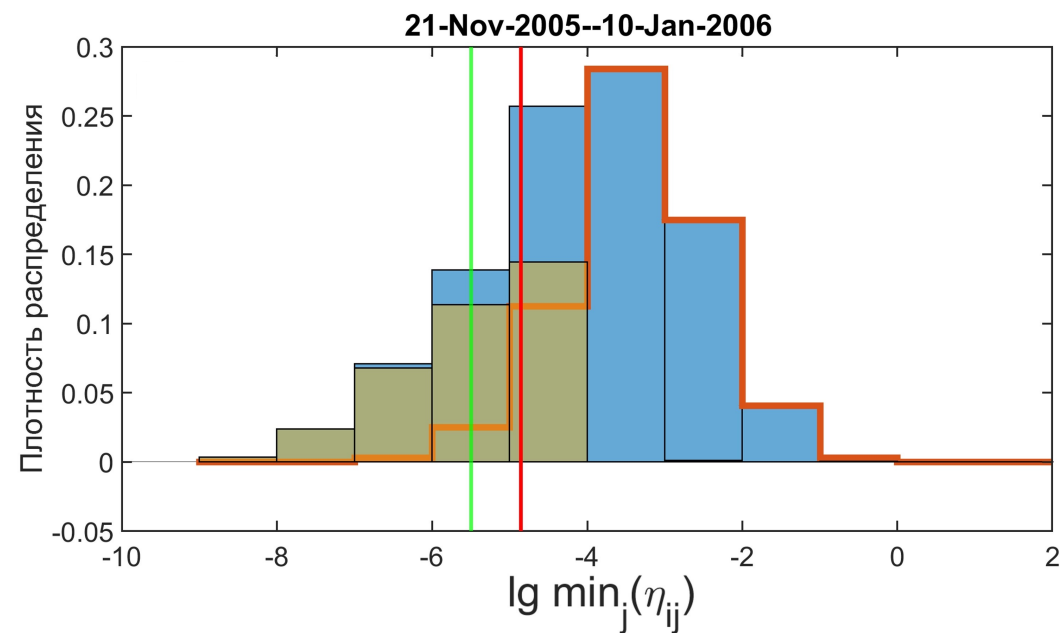
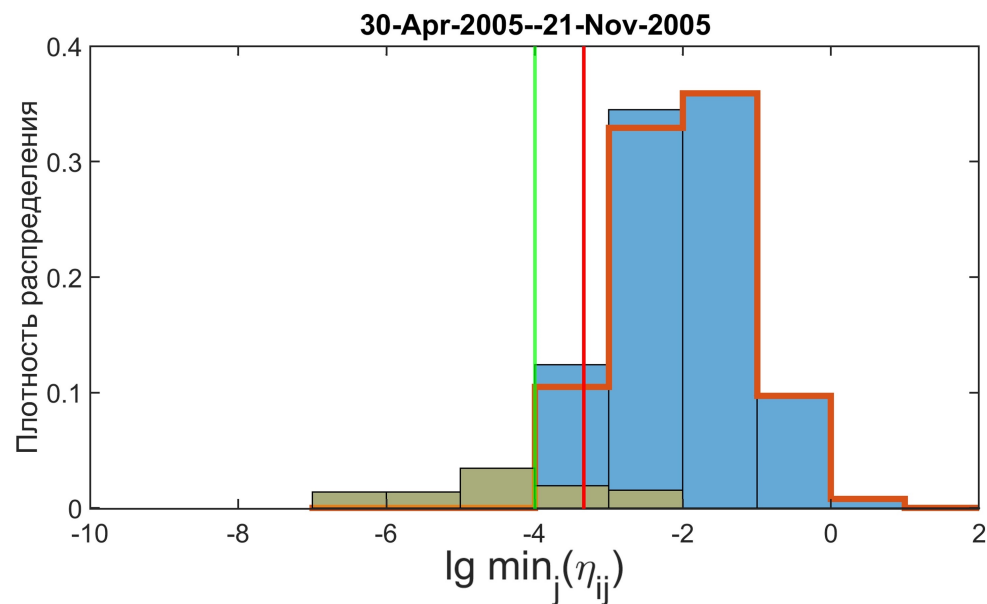
$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij} r_{ij}^{df} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases}$$

t_{ij} – время между событиями i и j , r_{ij} – пространственное расстояние между ними, m_i – магнитуда события i . b - параметр закона Гутенберга-Рихтера; df – фрактальная размерность распределения гипоцентров или эпицентров землетрясений.

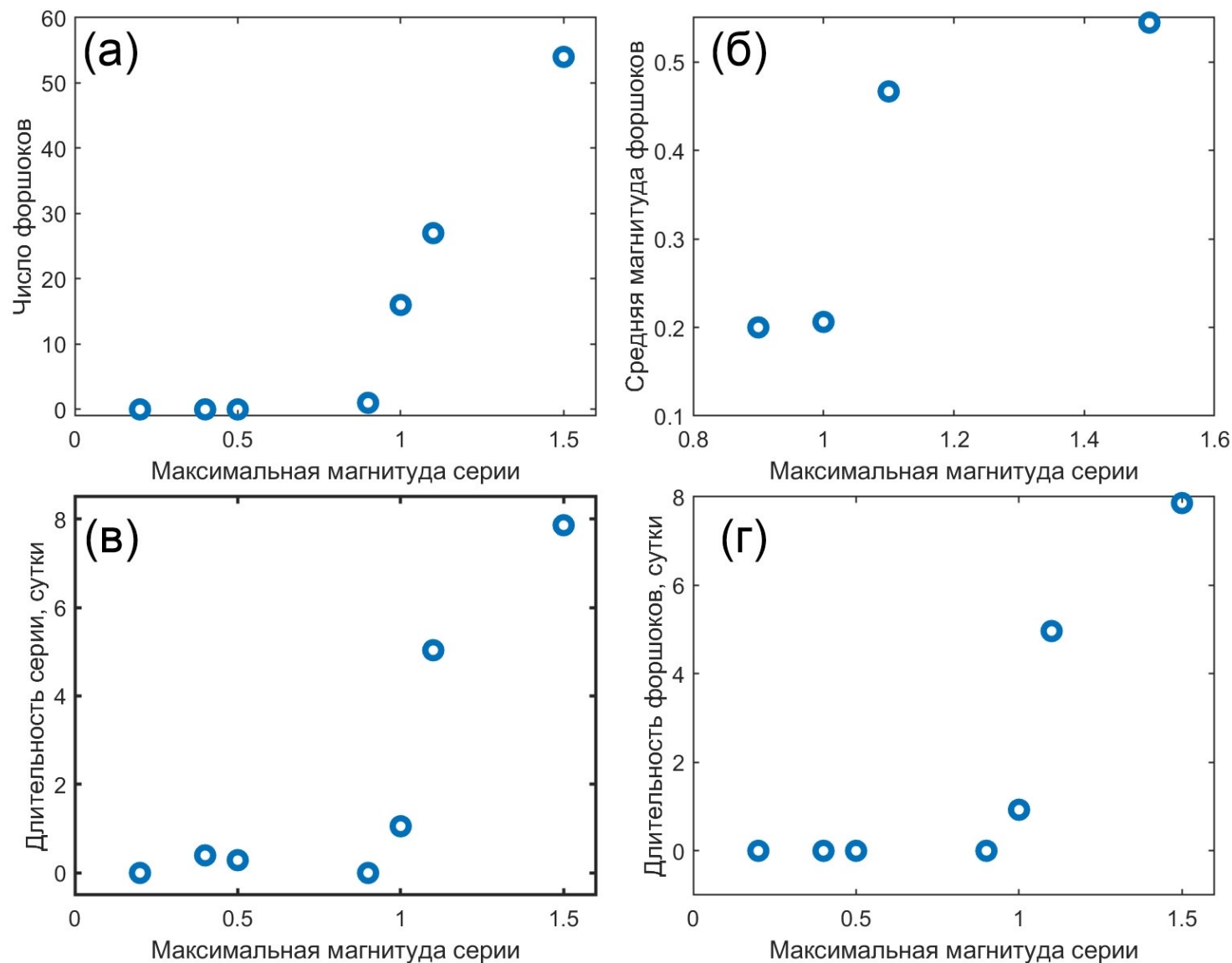


Распределение расстояния до ближайшего соседа для трёх различных каталогов в 1984-1989 годах: всей Северной Калифорнии (синий), Северной Калифорнии без Гейзеров (фиолетовый), Гейзеров (оранжевый) из [Малютин, 2023]

Фазы активизации перед извержением вулкана

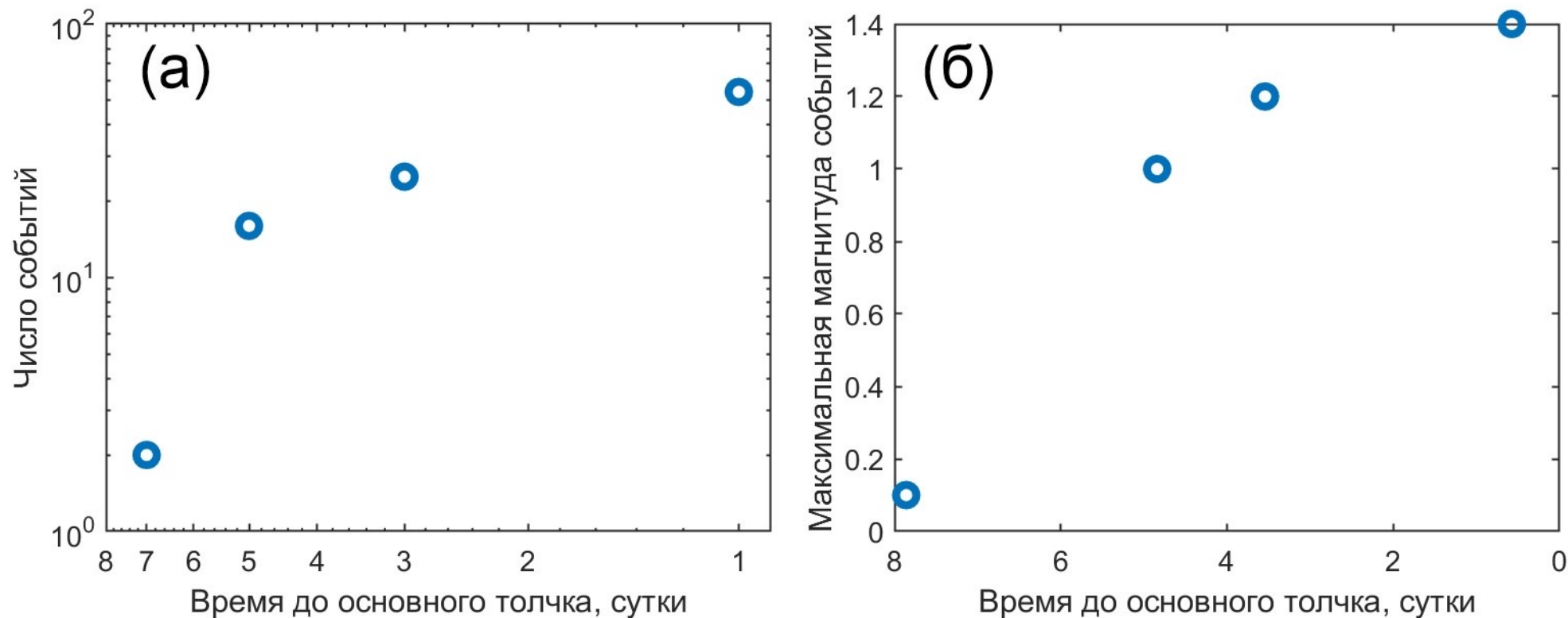


Закономерности серий



Зависимости от магнитуды
сильнейшего события в серии:
(а) – числа форшоков серии,
(б) – средней магнитуды форшоков,
(в) – общей длительности серии (от
первого форшока до последнего
афтершока) ,
(г) – длительности форшоков (от
первого форшока до основного
толчка)

Закономерности серий



Зависимости от времени до основного толчка: (а) – числа форшоков (построено по совокупности трёх самых длинных серий), (б) – максимальной магнитуды форшоков (построено только по самой длинной серии). В обоих случаях использовалось окно шириной двое суток.