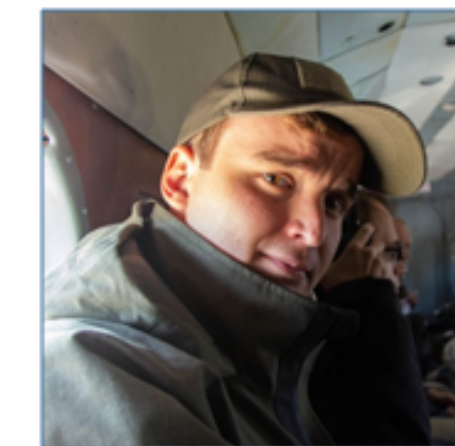


# Влияние закачки флюида на эволюцию сейсмического режима

Малютин П.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup> ИТПЗ РАН,



Закачка флюида вызывает перераспределение давления в районе скважины. Это может вызвать изменение сейсмического режима, который на разных этапах инъекции может меняться по-разному. В данной работе методом ближайшего соседа по каталогам эксперимента по созданию ГЦС в Сульц-су-Форе (Франция) и действующего геотермального месторождения в районе Гейзеров (США) исследуются кластеры сейсмичности на начальном и установившемся этапах закачки флюида.

## Теория

Если для какого-то события можно определить его событие-родитель, то эти землетрясения, имеющие причинно-следственную связь, считаются кластеризованными. Если событие не является ни потомком, ни родителем какого-либо землетрясения, то оно считается случайным и называется синглом. Мерой близости между событиями является функция близости [4]:

$\eta_{ij} = t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i}$ , если  $t_{ij} > 0$  ( $+\infty$ , если  $t_{ij} \leq 0$ ), где  $b$  – b-value;  $d_f$  – фрактальная размерность;  $t_{ij}$  – время между  $j$ -ым и  $i$ -ым событиями;  $r_{ij}$  – расстояние между гипоцентрами  $i$ -го и  $j$ -го событий;  $m_i$  – магнитуда  $i$ -го события. Функция близости вычисляется для всех пар событий в каталоге, причём статистически значимо именно «расстояние» до события, произошедшего до данного. Событие, расстояние до которого для данного землетрясения минимально, называется ближайшим соседом [1]. Если для кого-то события  $j$  расстояние до ближайшего соседа  $i$  значительно меньше большинства парных расстояний в каталоге (т.е.  $j$  произошло аномально «близко» к  $i$ ), то можно рассматривать  $i$  как родителя  $j$  [1].

Для поиска этого «порогового» расстояния используется непараметрический метод, описанный в работе [7]. Одним из основных преимуществ метода ближайшего соседа является то, что данный подход является гибким и может быть применен к различным типам данных о землетрясениях, в том числе к данным о землетрясениях с разной магнитудой и расположенных в разных зонах активности. Он не требует заранее заданного числа кластеров, а вместо этого он позволяет определить количество кластеров, их размер и форму, исходя из структуры данных. Кроме того, данный метод не требует определения *начальных значений центров* кластеров, это происходит «автоматически». Также метод ближайшего соседа является устойчивым к значениям b-value и величине фрактальной размерности [4].

## Сульц-су-Форе

В начале 90-х годов прошлого века в коммуне Сульц-су-Форе во Франции был начат эксперимент по созданию геотермальной циркуляционной системы. Были пробурены скважины на глубину до 3.6 км, а также было проведено гидравлическое стимулирование коллектора. Основная идея проекта заключалась в использовании тепла, выделяющегося из глубоких горных пород, для производства электроэнергии. Для этого была создана циркуляционная система, в которой вода извлекалась из глубоких скважин, проходила через теплообменники и возвращалась в землю через другую скважину. [1] Основной проблемой было то, что при эксплуатации системы был обнаружен риск землетрясений, связанных с изменением напряжений в земле.

Известно, что гидроразрыва не произошло, т.е. закачка шла по несформированной структуре [2]. Однако после построения реального и случайного распределений (рис. 1) с коэффициентом  $k = 1$  (т.е. доля случайных событий равна 1) не удалось выделить кластеризованных событий. Распределения «наложились» друг на друга.

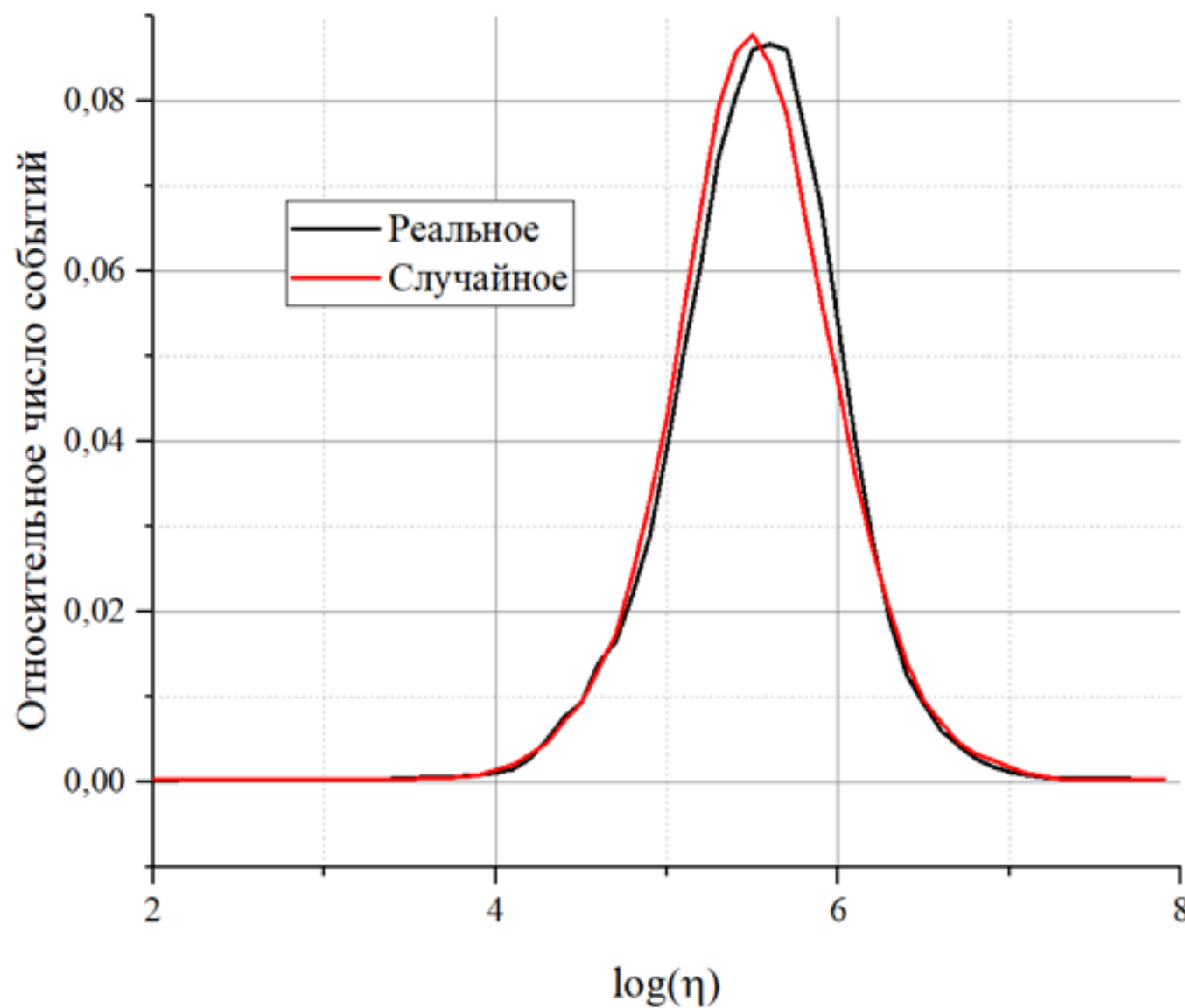


Рис. 1. Распределение расстояния до ближайшего соседа «реального» и «случайного» каталогов. Видно однокорбное распределение реального каталога, что говорит об отсутствии связанных событий.

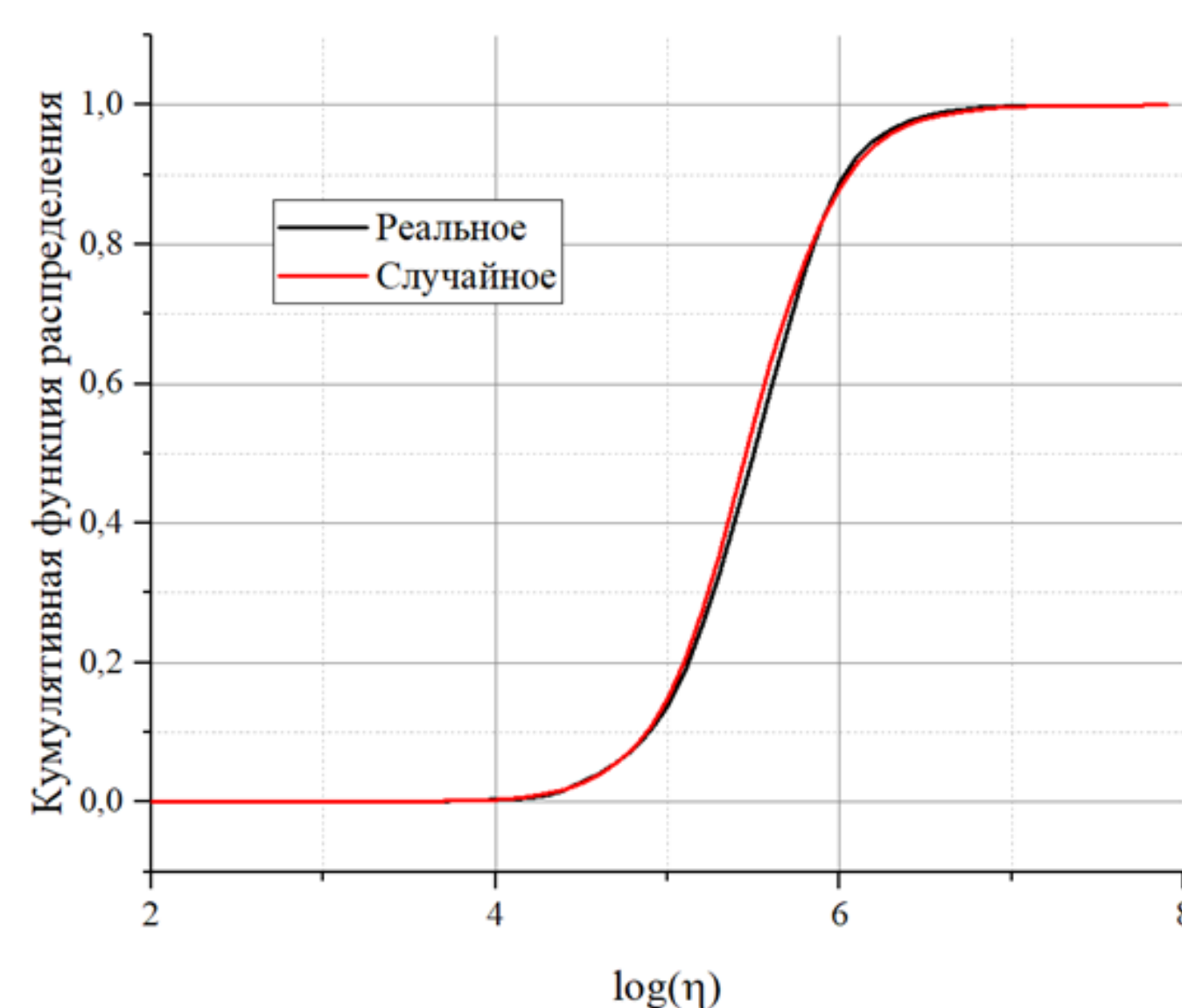


Рис. 2. Кумулятивная функция распределения для реального и случайного каталогов, построенная для подтверждения их однородности.

Однако интересно то, что распределение получилось одномодальным. Из-за установленной однородности реального и случайного распределений, следует что в эксперименте отсутствуют связанные события. Таким образом, продуктивность в данном эксперименте постоянна и равна нулю. На наш взгляд, это связано с тем, что течение флюида происходило по еще несформированной структуре, в которой не успевали образовываться устойчивые кластеры сейсмичности. К сожалению, данные после гидроразрыва данной области недоступны, поэтому нет возможности напрямую подтвердить эту гипотезу.

Чтобы исследовать влияние района Гейзеров, были построены несколько (представлен только один) распределений до ближайшего соседа для разных временных интервалов, которые показывают, насколько изменяется сейсмическая активность в районе Северной Калифорнии (рис. 5): в данной случае - явный пик и два схожих «ответвления» в 1984-1989 годах. Это распределение есть сумма двух сейсмичностей разной природы.

Таким образом, используя функцию близости, можно выделять не только кластеризованные события какого-то региона с одной природой сейсмичности, но и кластеры различной природы, причём это получается «автоматически»

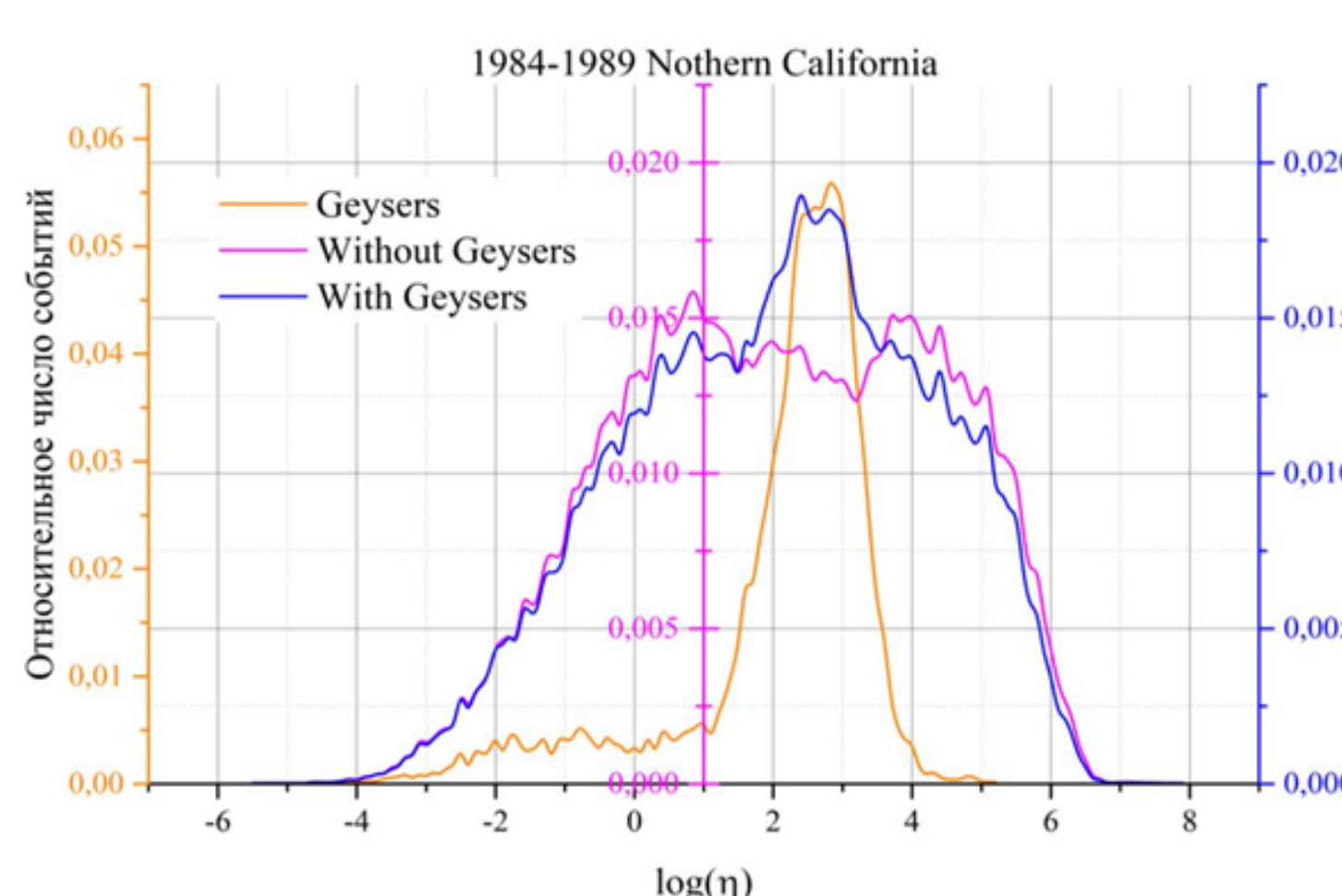


Рис. 5. Распределение расстояния до ближайшего соседа для трёх различных каталогов в 1984-1989 годах: всей Северной Калифорнии (синий), Северной Калифорнии без Гейзеров (фиолетовый), и, собственно, Гейзеров (оранжевый). Для распределения для всей Северной Калифорнии виден один явный горб посередине и два менее заметных горба. Этот «необычный вид» объясняется наложением разных сейсмических районов в Северной Калифорнии – «обычной» сейсмичности и сейсмичности в Гейзерах.

## Гейзеры

Район гейзеров - это геотермальное месторождение, расположенное в Калифорнии, примерно в 115 км к северу от Сан-Франциско. Это одно из крупнейших в мире геотермальных месторождений, состоящее из 22 геотермальных электростанций установленной мощностью 1517 МВт.

Для района Гейзеров использовался уточненный каталог [9, 10] для Северной Калифорнии. В данной работе использованы данные за 1984-2011 гг., так как для более поздних дат отсутствует информация по режимам закачки.

Далее был построено распределение до ближайшего соседа для выбранного района (рис. 3). Как видно из распределения, левый горб достаточно «мал» по сравнению с правым. Это, а также большое значение  $k = 0.89$ , говорит о том, что доля несвязанных событий в этом районе велика. Пороговое расстояние  $\lg \eta_0 = 1,4$  (рис. 4).

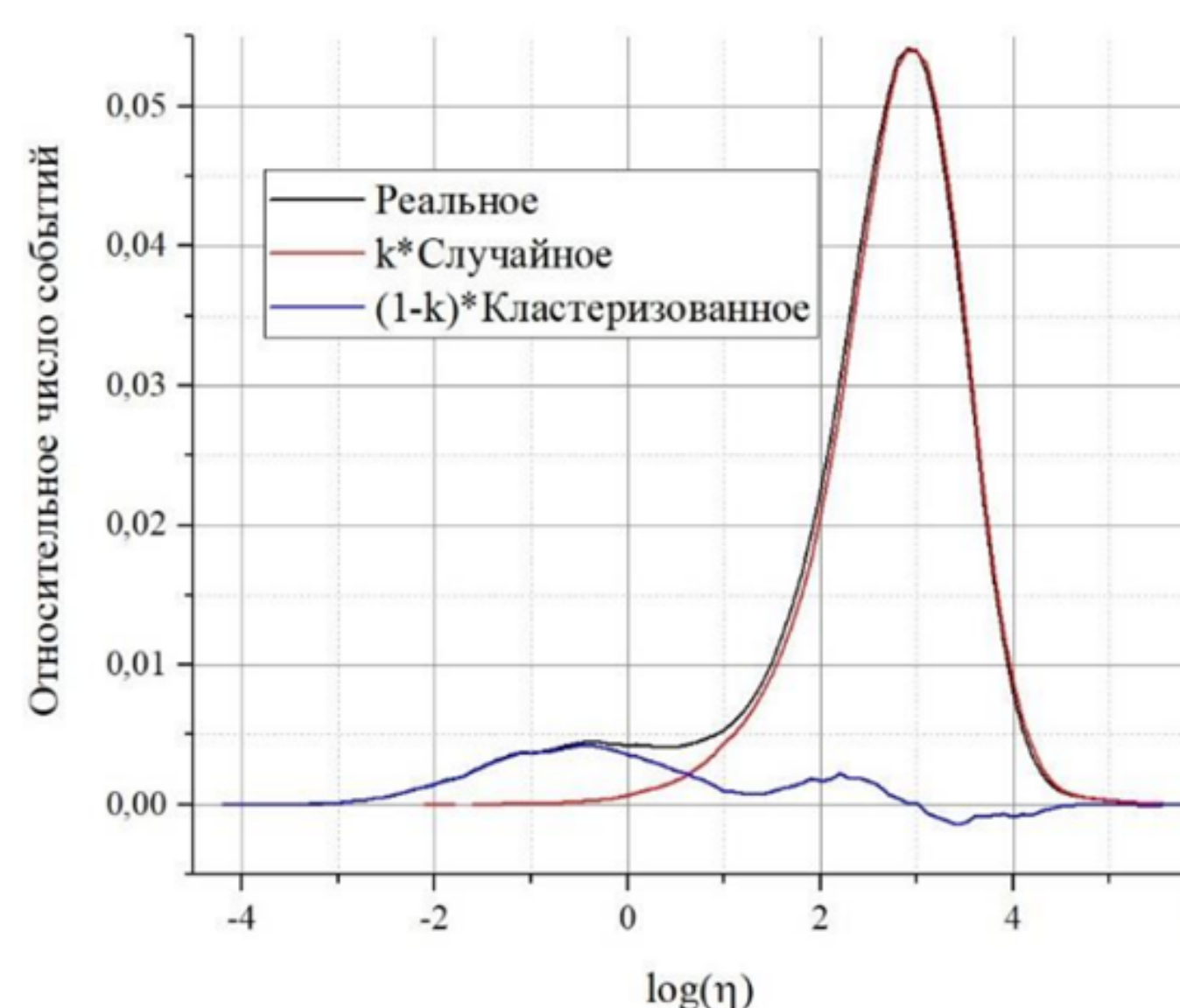


Рис. 3. Распределение расстояний до ближайшего соседа для района Гейзеров. Видно, что левый горб связанных событий достаточно мал, что говорит о малой доле кластеризованных событий.

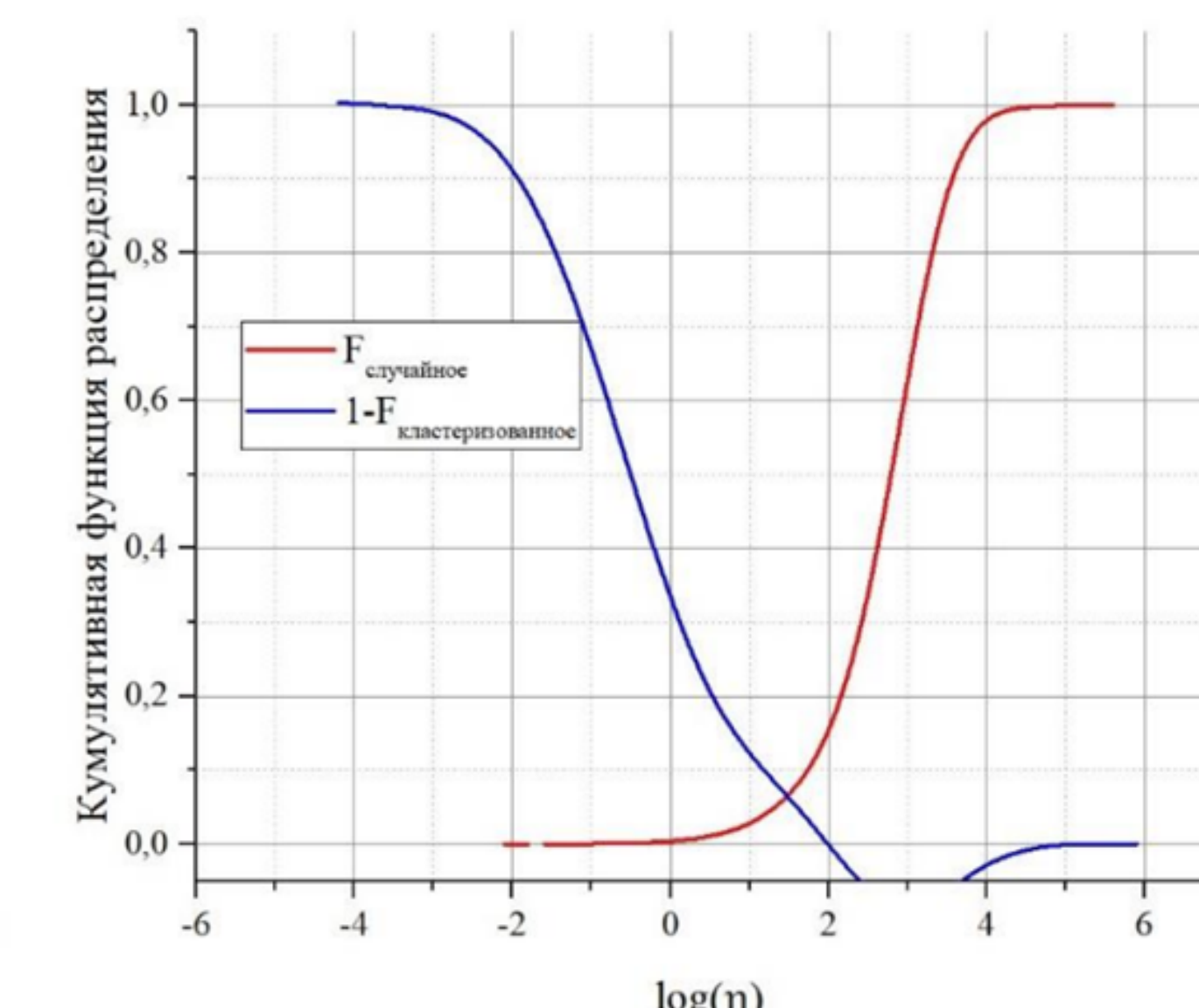


Рис. 4. Кумулятивная функция распределения, необходимая для нахождения порогового значения.

Малость горба кластеризованных событий в районе Гейзеров объясняется тем, что, в отличие от эксперимента в Сульц-су-Форе, сформировавшиеся структуры уже имеются, но, по-видимому, не могут сравниться по относительному размеру с кластерами «обычной» сейсмичности.

Также видно, что для кластеризованных событий кумулятивная функция распределения опускается ниже нуля, это связано с тем, что «распределение» кластеризованных событий является не «самостоятельным» распределением, а разностью реального и случайного.

## Выводы

-Для эксперимента в Сульц-су-Форе однокорбное распределение можно объяснить отсутствием сформировавшихся кластеров сейсмичности, в которых могут наблюдаться связанные события. Для подтверждения данной гипотезы могут быть полезны данные после гидроразрыва пласта (ГРП) в данном эксперименте;

-Малость горба кластеризованных событий в районе Гейзеров объясняется тем, что, в отличие от эксперимента в Сульц-су-Форе, сформировавшиеся структуры уже имеются, но, по-видимому, не могут сравниться по относительному размеру с кластерами «обычной» сейсмичности;

-«Трёхгорбье» распределения в Северной Калифорнии ещё раз доказывают удобство функции близости и метода ближайшего соседа для выявления кластеров сейсмичности. С их помощью можно находить сейсмические режимы различной природы и масштабов в пределах одного региона, используя, по сути, только каталог землетрясений;

1) Balesi M., Paczupki M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical review E – 2004. – Т. 69. – № 6. – С. 066106.  
 2) Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula  $\log N = a + bM$  and its confidence limits // Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. – 1965. – Т. 43. – С. 237-239.  
 3) Shebalin P. N., Narteau C., Baranov S. V. Earthquake productivity law // Geophysical Journal International. – 2020. – Т. 222. – № 2. – С. 1264-1269.  
 4) Баранов С. В., Шебалин П. Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных aftershock – 2019.  
 5) Zallapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophysical Journal International. – 2016. – Т. 207. – № 1. – С. 608-634.  
 6) Marsan D., Heimstetter A. How variable is the number of triggered aftershocks? // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – Т. 122. – № 7. – С. 5544-5560.  
 7) Sanyal S. K., Enezy S. L. Fifty years of power generation at the Geysers geothermal field, California—the lessons learned // 36th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California. – 2011.  
 8) Zallapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2013. – Т. 118. – № 6. – С. 2847-2864.  
 9) Waldhauser F., Schaff D. P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2008. – Т. 113. – № 88.  
 10) Waldhauser F. Near-real-time double-difference event location using long-term seismic archives, with application to Northern California // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2009. – Т. 99. – № 5. – С. 2736-2748. 29.  
 11) Смирнов В. Е., Пономарев А. В. Физика переходных режимов сейсмичности. – 2020.