



Родкин М.В.<sup>1,2</sup>, Прохорова Т.В.<sup>1</sup>, Рукавишников Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

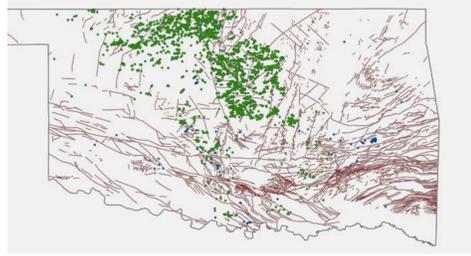
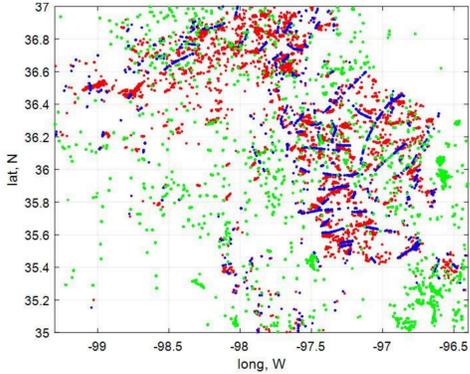
E-mail: rodkin@mitp.ru

## Аннотация.

Рассматриваются тенденции изменения характера вызванной сейсмичности со временем. На ряде примеров обсуждается тенденция уменьшения вызванной сейсмичности при длительном сильном антропогенном воздействии. Такой характер изменения может обуславливаться постепенной релаксацией исходных тектонических напряжений. Подтверждение этой тенденции могло бы иметь существенное практическое значение.

## Область интенсивной добычи сланцевой нефти (Оклахома, США)

Данная область достаточно велика и при этом достаточно полно снабжена фактическими данными по сейсмичности, расположению разломов и величинам объемов закачек и добычи нефти и газа.

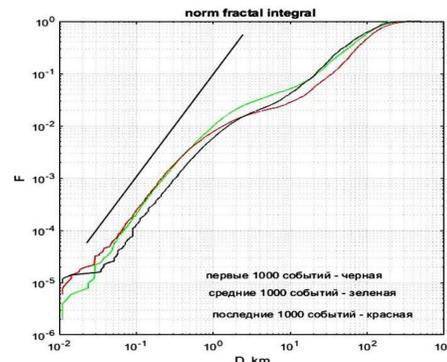
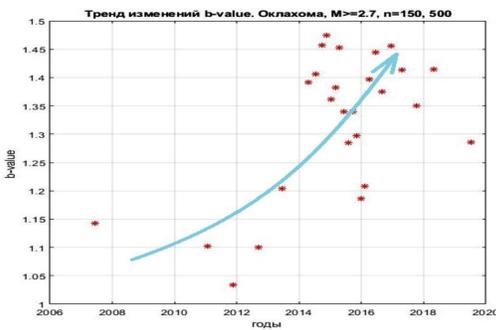


Зоны концентрации разломов расположены в стороне от области наибольшего развития добычи и сейсмичности (зеленые точки). Две области концентрации очагов соответствуют областям развития сейсмичности на рисунке слева.

## Область наиболее интенсивного антропогенного воздействия:

очаги землетрясений с  $M \geq 2.7$  (красные точки); расположение 1000 скважин с максимальными объемами закачек/мес. (зеленые точки); ближайшие к землетрясениям разломы (проекция на разлом) показаны синим цветом.

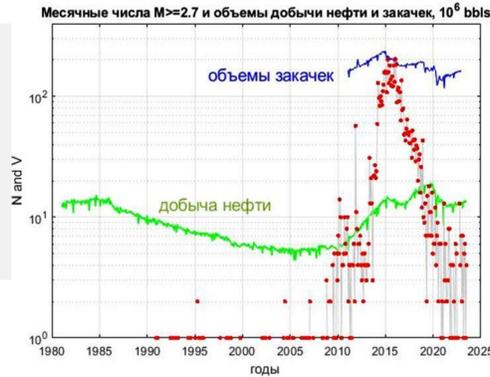
Видно достаточно независимое расположение разломов, землетрясений и положения скважин.



## Изменение фрактальной размерности эпицентров землетрясений со временем

Изменение доли  $\log(\text{числа пар эпицентров землетрясений})$  с  $R$  расстоянием между ними от  $\log(R - \text{расстояния между ними})$  для первой тысячи землетрясений (черная линия), средней части периода нагрузки (зеленая) и для последней тысячи событий (красная). Видно, что с течением времени все более четко выделяется промежуточная область размером 1–10 км, видимо, отвечающая характерному размеру влияния отдельной скважины.

Линией показан наклон, отвечающий равномерному распределению эпицентров по площади.



## Изменения объемов добычи нефти, суммарных объемов закачек (более подробные помесечные данные) и потока землетрясений

Видно, что после 2015 года, при относительно небольших изменениях антропогенного воздействия, наблюдается сильное нарастающее уменьшение интенсивности потока событий.

## Другие, менее четкие, но статистически выявляемые, тенденции изменения режима вызванной сейсмичности со временем.

Для очагов землетрясений и разломов имеют место относительно слабые тенденции:

- С течением времени расстояние до разломов немного растет (вызванная сейсмичность расплывается).
- С течением времени магнитуда событий уменьшается (аналог увеличения наклона графика повторяемости).
- Сейсмическая активность слегка смещается к северо-западу.
- Глубина очагов растет, но это, скорее всего артефакт изменения регистрации.

## Для соотношения землетрясение – ближайшее предшествующее сильное антропогенное воздействие:

Со временем растет время запаздывания землетрясения. Эта связь существенно сильнее с номером землетрясения (внутренним временем системы); т. е. время запаздывания быстрее росло в период максимально высокой сейсмической активности.

**Технологическая тенденция:** со временем растет объем закачек.

## Область гигантского газового месторождения Гронинген, Нидерланды

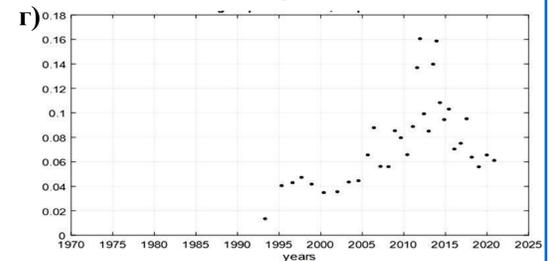
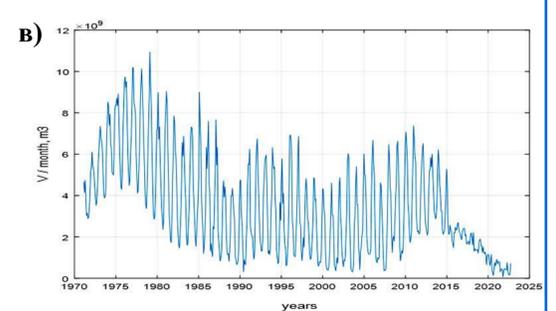
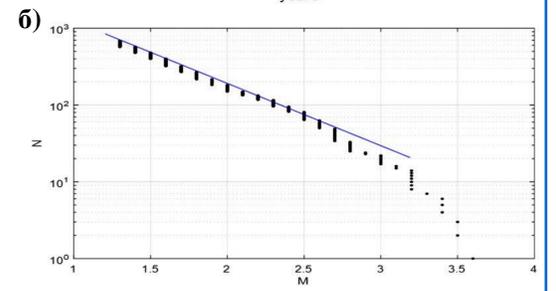
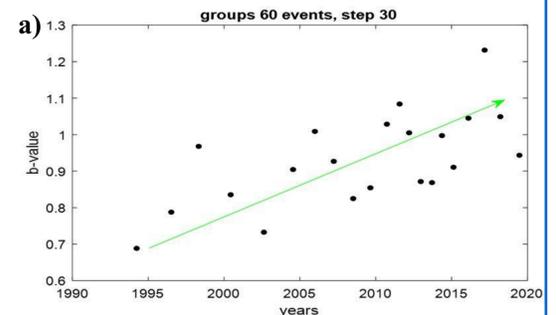
В области месторождения Гронинген даже не сильные землетрясения, ввиду слабых обводненных грунтов, вызывали существенный ущерб.

За все время регистрации наблюдается рост наклона графика повторяемости (а) и резкое увеличение наклона графика повторяемости в области относительно более сильных событий (б).

Были приняты решения резко сократить добычу (в) и закрыть месторождение к 2030 году.

Резкое уменьшение числа событий практически совпало с уменьшением добычи, поэтому интерпретация неоднозначна. Даны изменения объемов добычи (в) и потока событий (г).

По материалам специального симпозиума (сентябрь 2022) отмечается определенное уменьшение максимальной ожидаемой магнитуды вызванных землетрясений, но также и подтверждается решение о прекращении добычи.



## Тенденция изменения величин b-value со временем

Область крайне неоднородная по значениям наклона графика повторяемости. В начальный период времени область более однородна, разброс меньше, использованы временные блоки по 150 событий; в основной области использованы блоки по 500 событий (все с перехлестом на половину набора данных). Видна отчетливая тенденция сильного увеличения наклона графика повторяемости со временем.

Дополнительно заметим, что для области резкого уменьшения потока событий (после 2018 года) намечается уменьшение наклона графика повторяемости.

## Обсуждение и выводы

В двух областях наиболее полно задокументированного сильного и длительного антропогенного воздействия и высокого уровня вызванной сейсмической активности выявился эффект уменьшения опасности вызванной сейсмичности со временем.

1. Практически все время воздействия наблюдается тенденция роста величин  $b$ -value, что отвечает меньшей вероятности реализации сильных событий.
2. По истечении некоторого времени происходит также и спад потока событий.

Не ясно, связано ли это, с исчерпанием исходной энергии напряженного состояния горных пород, и каковы поток будут событий и наклон графика повторяемости в дальнейшем.

Подобный эффект ранее наблюдался для области Ингури-ГЭС [Chelidze et al., 2023]; а также в [Vorobieva et al., 2020] указывалось, что с ростом кумулятивной нагрузки растет угол наклона графика повторяемости в области относительно более сильных вызванных землетрясений.

**В случае подтверждения выявленных закономерностей по уменьшению опасности вызванной сейсмичности, полученные результаты могут иметь важное практическое применение.**

Благодарность проф. А. Кийко за предоставление каталога землетрясений по области месторождения Гронинген.

## Основные публикации авторов:

Родкин М.В., Нго Тхи Лы, Т. А. Рукавишников, Фунг Тхи Ханг. Вызванная сейсмичность при добыче нефти и газа – обзор // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 4-7 июня 2019 г.); материалы V Международной конференции / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. М.: ТПУС ПРЕРС, 2019. С. 98–103, ISBN 978-5-94588-268-3

Rodkin M.V., Lyubushin A.A. Can Induced Seismicity Decrease Under a Long Strong Anthropogenic Excitation? // Novel Research in Sciences. V. 14. No 3. NRS.000840. 2023. DOI: 10.31031/NRS.2023.14.000840

Родкин М.В., Яраханова Д.Г. О режимах вызванной сейсмичности: неоднозначный ответ и противоречивые тенденции // Материалы: Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития нефтегазовых компаний России в современных условиях». Казань, 2023. С. 354–356.

## Основные работы по теме других авторов:

Chelidze T., Matcharashvili T., Mepharidze E., Dovgal N. Complexity in Geophysical Time Series of Strain/Fracture at Laboratory and Large Dam Scales: Review // Entropy. 2023. V. 25. No 3. 467. DOI: 10.3390/e25030467

Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Condition of Occurrence of Large Man-Made Earthquakes in the Zone of Oil Production, Oklahoma // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. No 6. P. 911–919. DOI: 10.1134/S10693513200601309