

**Двадцать первая международная конференция  
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"  
13 - 17 ноября 2023 г., Москва, Россия**

**АНАЛИЗ СМЕЩЕНИЙ ПУНКТОВ ГНСС  
В РАЙОНЕ КОНТАКТА АНАТОЛИЙСКОЙ И АРАВИЙСКОЙ  
ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПЛИТ,  
СОПУТСТВУЮЩИХ ТУРЕЦКОМУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЮ 6.02.2023 Г.**

**Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Розенберг Н.К.  
Лаборатория спутниковых методов изучения геофизических процессов  
ИФЗ РАН, Москва**

6 февраля 2023 года с интервалом в девять часов на юго-востоке Турции произошли два мощных землетрясения. Эпицентр первого, с магнитудой 7.8, находился в районе Шехиткамиль в Газиантепе, эпицентр второго, с магнитудой 7,5, — в районе Экинёзю в Кахраманмараше. После землетрясений были зарегистрированы многочисленные афтершоки, с магнитудой самого сильного до 6,7. Землетрясение признано самым мощным в Турции после землетрясения 1939 года в Эрзинджане.



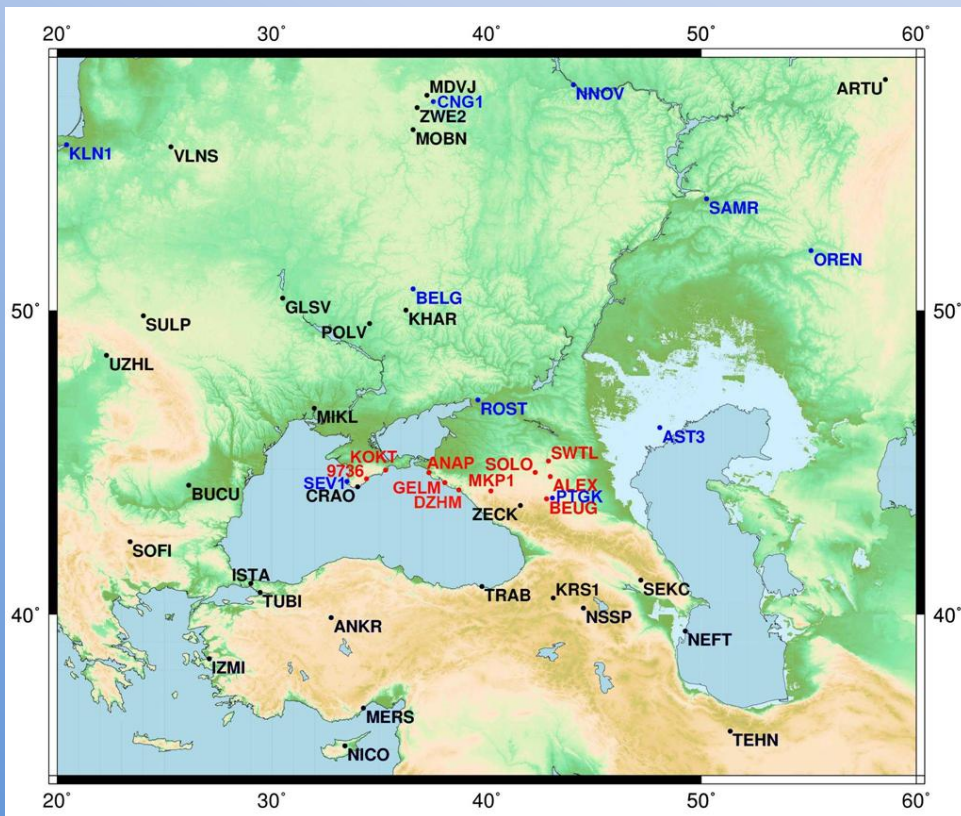
Карта двух основных сейсмических событий (звездочки) и роя последующих афтершоков магнитудой более 4 и схема расположения тектонических плит. Черными стрелками указаны направления движений Аравийской и Анатолийской плит

Район, в котором произошло землетрясение, расположен на контакте Аравийской и Анатолийской плит по Восточно-Анатолийскому разлому.

Движение плит создаёт давление на зоны разломов между ними. Внезапный выброс накопленной энергии этого давления вызывает землетрясения.

Аравийская плита - наиболее активная. Ее поддвиг под Евразийскую плиту оказывает непосредственное влияние на формирование и развитие складчатых сооружений Большого Кавказа и Горного Крыма.

Сотрудники лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ РАН проводят наблюдения ГНСС на территории Северного Кавказа с 1991 г. [Reilinger et al., 1991]. С тех пор сеть пунктов была расширена и модифицирована. В сентябре 2022 г. был проведен очередной цикл повторных геодезических ГНСС (GPS/ГЛОНАСС) наблюдений на пунктах Крымско-Северокавказской сети. Обработка данных проводилась для расширенной территории, включающей не только Кавказ, но и район контакта Анатолийской и Аравийской плит с привлечением большого количества близлежащих пунктов IGS и ФАГС. [Галаганов О.Н. и др., 2023]



В процессе обработки данных были получены среднесуточные и средние на эпоху (цикл) измерений геоцентрические и геодезические координаты пунктов в системе отсчета ITRF, скорости движения пунктов, а также построено деформационное поле региона для временного интервала 2005 – 2022 гг.

Расположение пунктов, использованных в работе: Крымско-Северокавказская сеть ИФЗ РАН, 2005-2022гг (красные); IGS (черные); фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС) (синие)

# Взаимодействие тектонических структур в районе Крымско-Кавказского региона

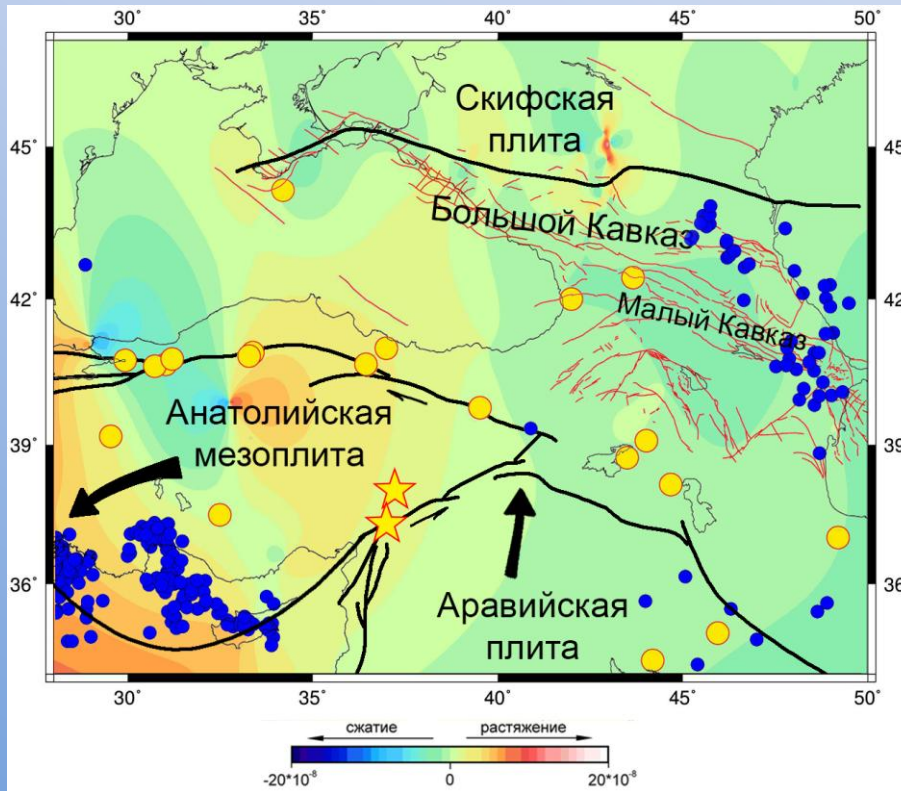


Схема расположения плит, оконтуривающих Крымско-Северокавказский регион. Черными стрелками указаны направления движений Аравийской и Анатолийской плит. Желтыми кружками показаны эпицентры сильнейших землетрясений за последние 100 лет, звездочками — эпицентры двух сильнейших турецких землетрясений 2023 г., синие кружки — эпицентры подкорковых землетрясений

Обнаруженные в процессе исследования аномальные значения деформаций на юго-западном побережье Черного моря, вероятно, связаны с интенсивными движениями активных плит. Сильнейшие за последние 100 лет землетрясения с  $M \geq 7$  в основном приурочены к границам плит, в том числе и два турецких землетрясения. При сопоставлении с полем деформаций видно, что данная область приходится на зону перехода между сжатием и растяжением.

Такой подход отражает влияние субмеридионального дрейфа Аравийской тектонической плиты на современное развитие Крымско-Кавказского региона в период, предшествующий катастрофической серии землетрясений в Турции в феврале 2023 г.

# Задачи исследования

Близость эпицентров турецких землетрясений к Крымско-Северокавказскому региону ставит вопрос о воздействии таких мощных сейсмических событий на окружающие геоструктуры, а следовательно, на смещения пунктов постоянных и повторных наблюдений ГНСС. Полученные результаты, дополненные измерениями 2022 г. многолетний ряд наблюдений в регионе, отражают современную геодинамическую обстановку, которая предшествовала турецким землетрясениям.

Анализ трехмесячного временного ряда для пунктов IGS с начала года до 31 марта, рассчитанного таким образом, чтобы охватить дату самых сильных землетрясений (6.02.2023), показывает поведение пунктов непосредственно до, во время и сразу после сейсмического события.

## **Задачи исследования:**

- 1) Анализ координат ближайших к эпицентрам пунктов IGS и их изменения во время двух сильнейших из турецких землетрясений 6.02.2023. Зависимость этих изменений при удалении от эпицентров
- 2) Анализ сейсмичности региона

# Международная ГНСС сеть (IGS)

- более 500 пунктов постоянных наблюдений, достаточно равномерно распределенных по всему миру
- реализация международной системы координат (ITRF),
- предоставление сырых непрерывных данных наблюдений, орбитальных и ионосферных продуктов
- исследование деформаций твердой Земли, влияния приливов,
- определение и поддержание орбит спутников,
- передача стандарта времени и частоты.

Данные ГНСС используются при определении скоростей смещений земной поверхности, что, в свою очередь, позволяет выявлять и исследовать пространственные изменения и по ним изучать геодинамические процессы.



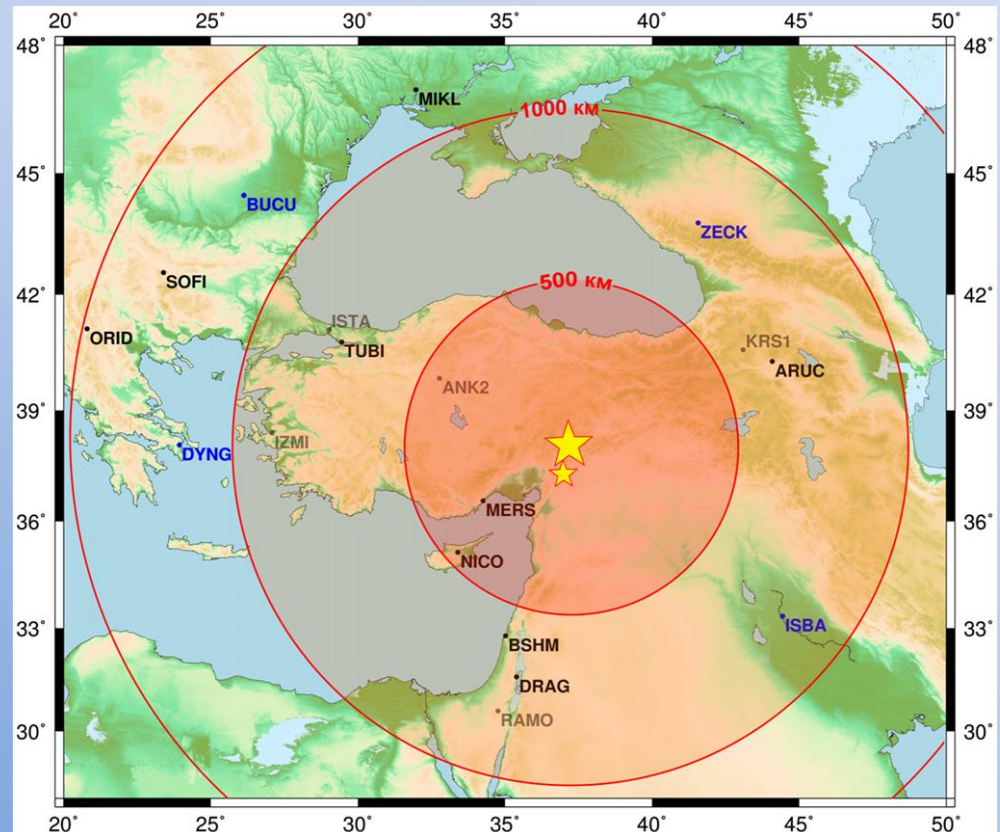
Станции IGS слева направо: ZECK , ARUC и IZMI

# Подготовка и обработка данных

Непрерывные наблюдения ГНСС позволяют фиксировать моментальные деформации, возникающие во время землетрясения, с привязкой по времени. В работе использовались данные наблюдений с 13 пунктов IGS, максимально приближенных к эпицентральной зоне Турецких землетрясений и находящихся на расстоянии не более 1500 км от их эпицентров. Данные в виде 90 суточных файлов для каждого пункта за период с 1 января по 31 марта 2023 г. взяты из открытых баз данных (<https://cddis.nasa.gov/>, <https://igs.bkg.bund.de/>)

Вычисления проводились с помощью программного комплекса Bernese 5.2. Определены среднесуточные значения геоцентрических координат пунктов в координатной системе ITRF20. Ошибка определения координат на одни сутки составила: для опорных пунктов в среднем 0.35 мм, для определяемых 0.8 мм.

Расположение пунктов IGS, использованных в анализе. Синие – опорные (приняты как перемещаемые во времени с постоянной скоростью), черные - определяемые, серые - не вошедшие в анализ из-за недостатка данных



# Изменение геоцентрических координат во времени

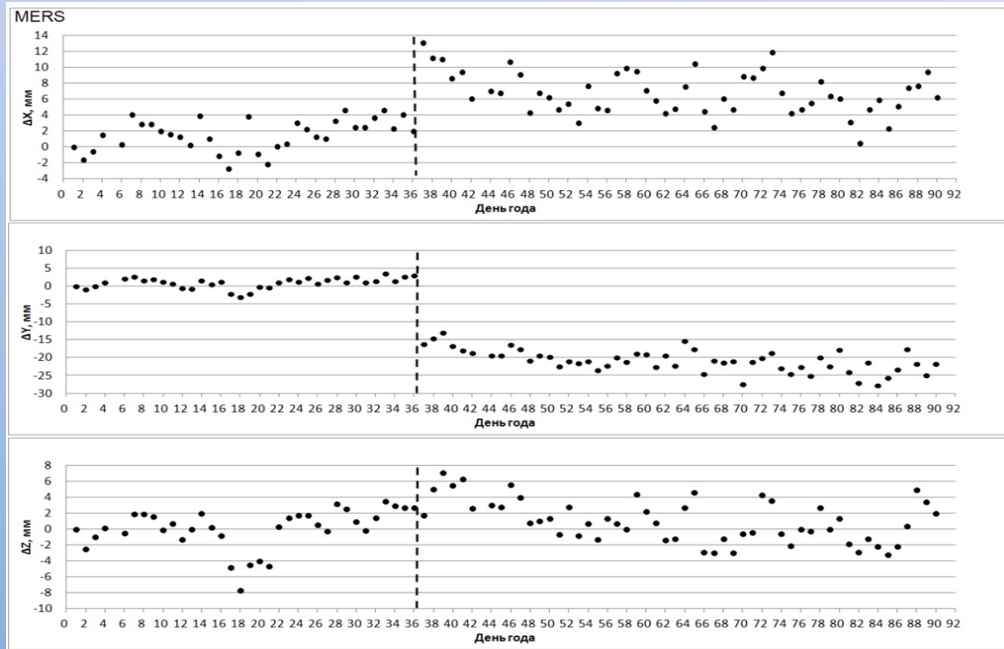
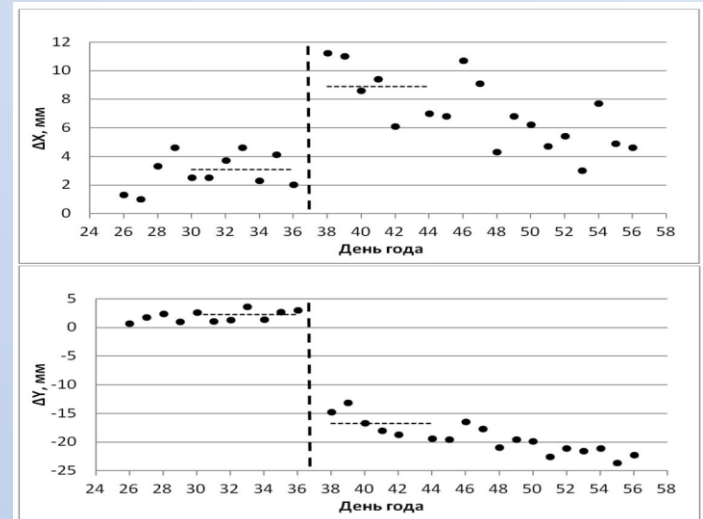


График изменения среднесуточных значений геоцентрических координат пункта MERS



Фрагмент левого графика, соответствующий времени землетрясения (37 день года). Горизонтальными пунктирными линиями показаны усреднения координат до и после сейсмического события

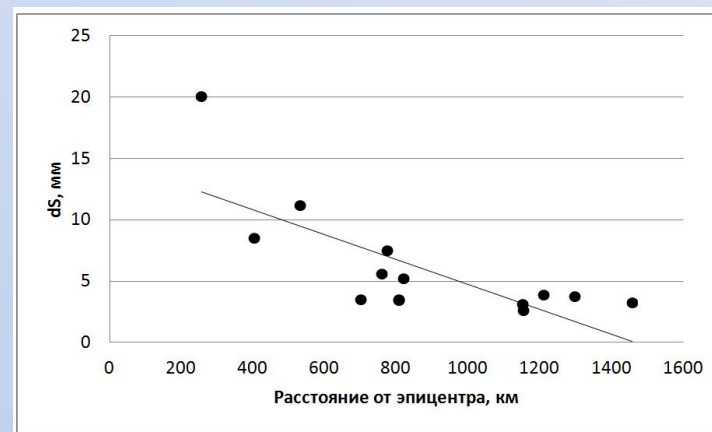
Оба сильнейших землетрясения, произошедших 6.02.2023 попадают по времени в один суточный файл. Событие отражается в сильном скачкообразном изменении главным образом плановых координат, в то время как на графике изменения вертикальной координаты в момент события смещения практически отсутствуют.

По усредненным данным за 7 дней до и после землетрясения для пункта MERS, ближайшего из обследованных, находящегося примерно в 250 км от эпицентров, координата X увеличилась на 5,7 мм, а Y уменьшилась на 19 мм.



# Изменение геоцентрических координат при удалении от эпицентров землетрясений

Пункт	Расстояние от эпицентра, км	dX, мм	dY, мм	dZ, мм	dS, мм
MERS	255	5,78	-19,01	2,93	20,08
NICO	401	2,29	-3,24	7,54	8,52
BSHM	530	-2,81	-0,11	10,83	11,19
ARUC	700	2,67	0,07	2,27	3,51
TUBI	757	-1,19	-5,34	1,23	5,61
RAMO	772	-0,90	1,28	7,34	7,51
ISBA	806	-3,23	1,43	-0,34	3,55
ISTA	806	-0,27	-2,32	2,52	3,43
ZECK	819	5,17	-0,31	-0,90	5,26
DYNG	1150	1,41	0,26	2,79	3,13
MIKL	1152	-1,57	-1,29	-1,69	2,64
BUCU	1210	-3,36	-1,31	-1,53	3,92
SOFI	1296	-0,01	1,09	3,59	3,75
ORID	1456	-0,85	2,30	2,13	3,25



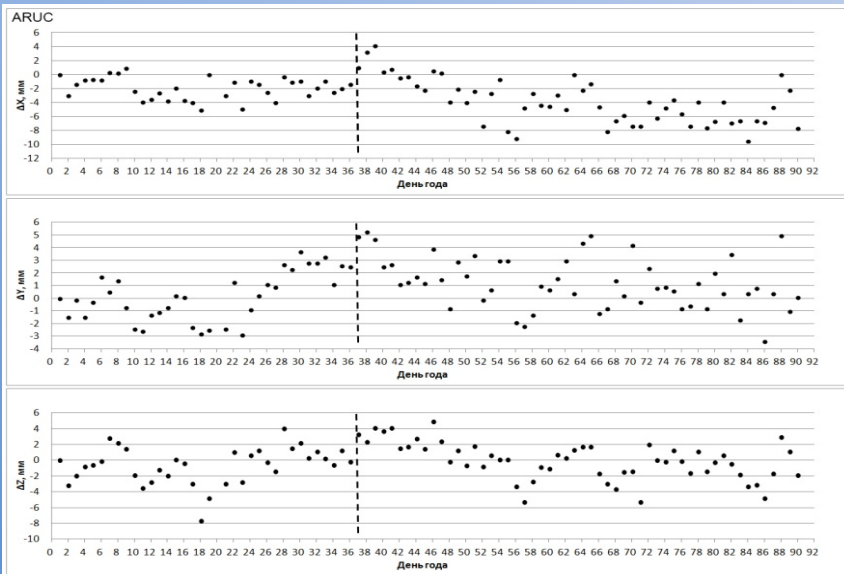
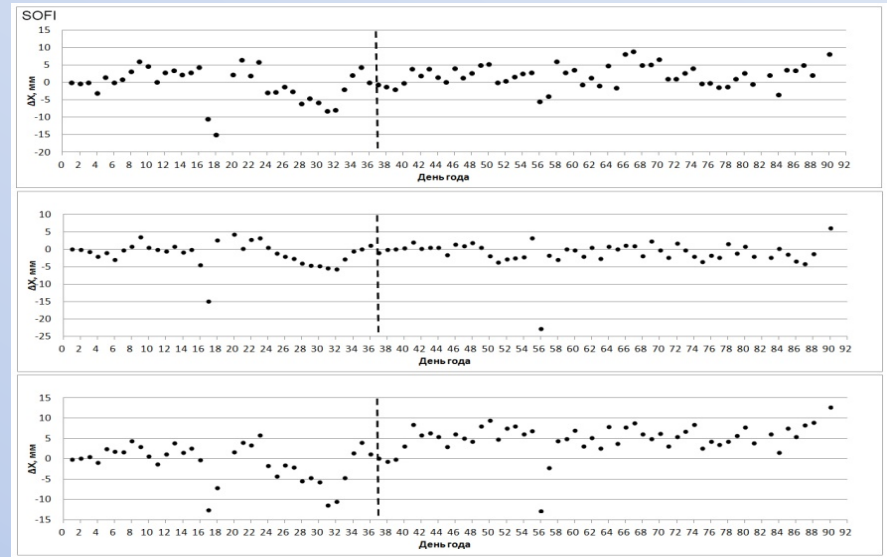
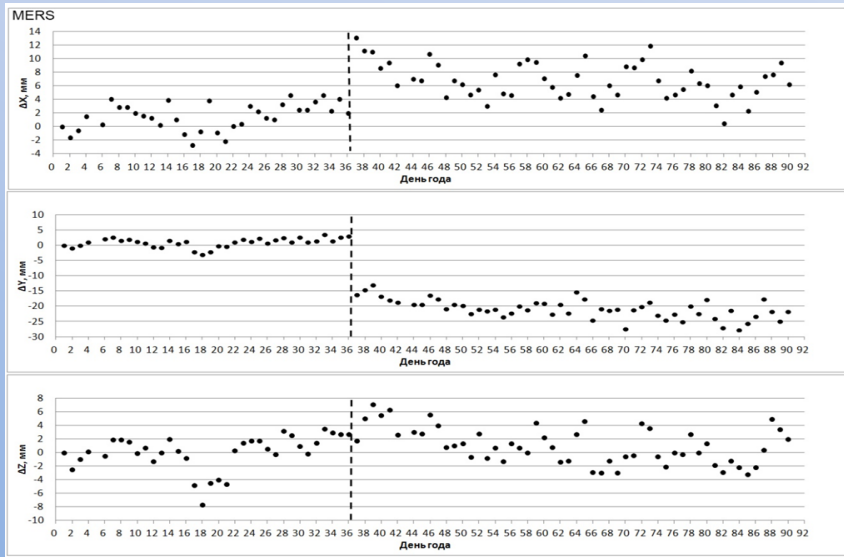
Зависимость изменения модуля полного вектора косейсмического смещения пунктов при удалении от эпицентров землетрясений

На графике приведены значения смещений для всех пунктов, использованных в анализе, без учета направления их смещения и независимо от их расположения относительно Восточно-Анатолийского разлома, по которому проходит граница Аравийской и Анатолийской плит.

Прослеживается линейная зависимость уменьшения полного вектора косейсмического смещения при удалении от эпицентров землетрясений.

Расстояние от эпицентров, значения изменения координат (по усредненным данным) и модуля полного вектора смещения

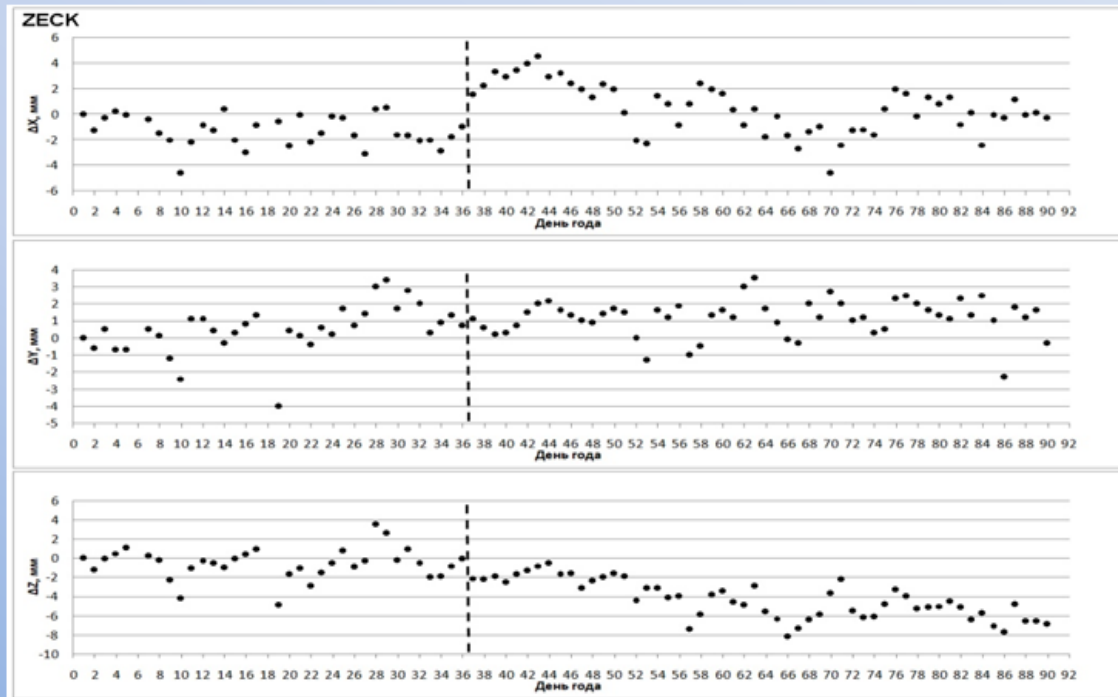
# Изменение геоцентрических координат при удалении от эпицентров землетрясений



Приведенные графики визуально иллюстрируют уменьшение скачка в изменении координат при удалении от эпицентров землетрясений:

Правый верхний график – пункт MERS, 255 км от эпицентров;  
правый нижний – пункт ARUC, 700 км от эпицентров;  
левый верхний – пункт SOFI, 1296 км от эпицентров;

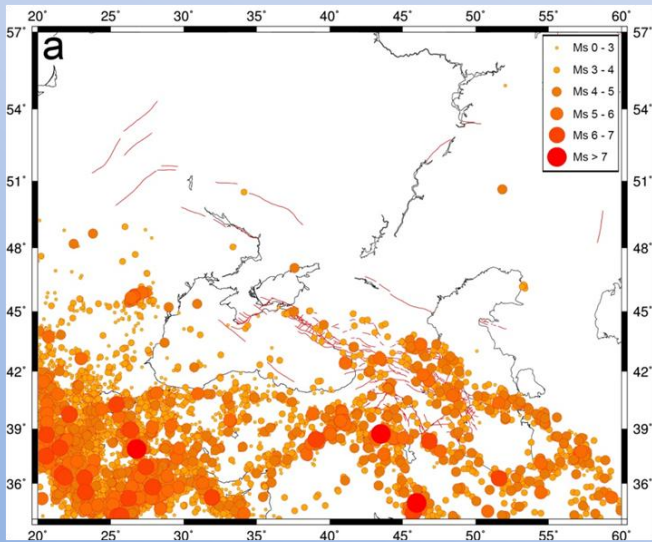
# Изменение геоцентрических координат во времени



Пункт ZECK, являющийся опорным при обработке данных с пунктов Крымско-Северокавказского геодинимического полигона ИФЗ, как и сам исследуемый регион, попадает в 1000 километровую зону вокруг эпицентров турецких землетрясений.

Несмотря на то, что пункт ZECK расположен на удалении около 800 км, на графике временного хода его координат также заметен скачок, хоть и не такой сильный (по X – около 3 мм).

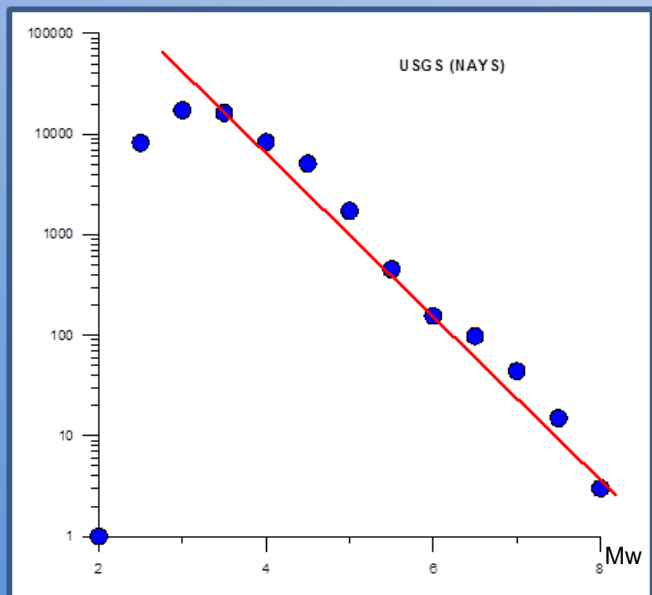
# Анализ сейсмичности региона



Для оценки сейсмической активности региона использовались данные каталога Геологической службы США (USGS).

Исследуемый регион характеризуется высокой сейсмичностью. За временной интервал исследования Кавказа (2005-2022гг) здесь произошло 20917 землетрясений, из которых 22 - с магнитудами  $M_w \geq 6$ .

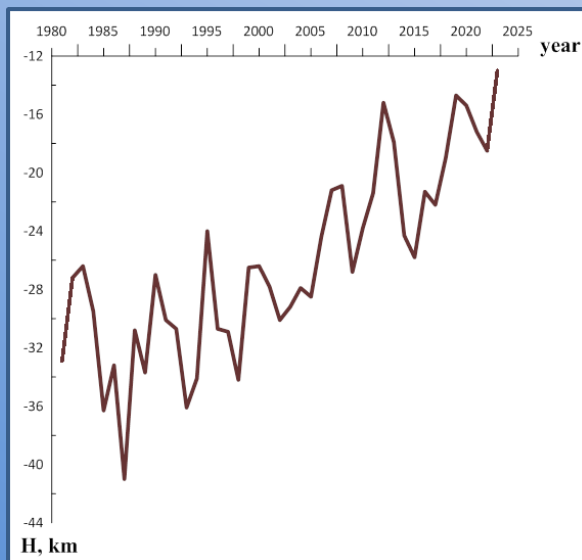
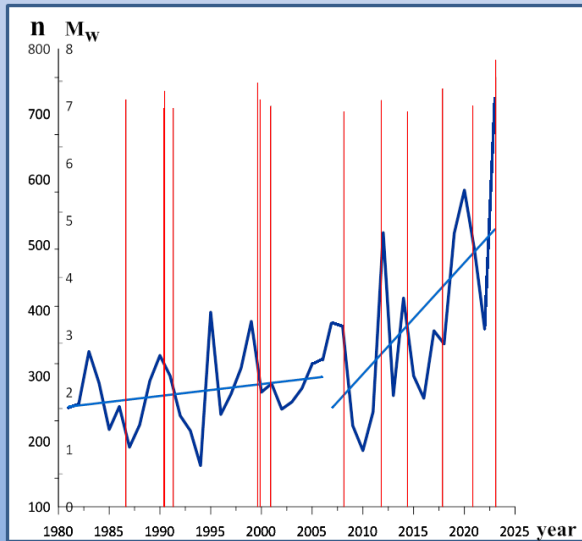
Карта эпицентров землетрясений за 2005-2022гг



На основе графика повторяемости землетрясений для рассматриваемой территории можно сделать вывод, что представительная часть каталога начинается с сейсмических событий  $M > 3.5$ . В дальнейшей работе рассматривались события магнитудами более 4.

График повторяемости землетрясений

# Анализ сейсмичности региона



Для периода 1981-2022 гг. просуммировано количество сейсмических событий за каждый год с  $M_w \geq 4$ . На график также нанесены самые крупные землетрясения (вертикальные красные линии с  $M_w \geq 7$ ). Крупные события происходили с периодом около 10 лет сериями из 3-х сильных землетрясений. Приблизительно с 2006 года события с  $M_w \geq 7$  начинают происходить достаточно равномерно раз в 5 лет, для этого же периода наблюдается возрастание количества событий за год. Угловой коэффициент аппроксимирующей линейной функции за период 1981-2006 гг. составлял 1.8, с 2006 до начала 2023гг он возрастает до 17.

Среднегодовые глубины сейсмических событий с 1990-х годов демонстрируют устойчивое стремление к более поверхностным процессам. Можно сделать аккуратный вывод, что скорее всего приблизительно с 2006 г. шла подготовка к землетрясению 2023 г.

Средняя глубина землетрясений за год

# Выводы

Пункт ZЕСК, являющийся опорным при обработке данных с пунктов Крымско-Северокавказского геодинимического полигона ИФЗ, как и сам исследуемый регион, попадает в 1000-километровую зону вокруг эпицентров турецких землетрясений, произошедших 6.02.2023, и как показывает данное исследование, испытывает определенное воздействие с их стороны.

На территории Кавказа можно ожидать частичных изменений в устойчивом режиме деформаций, сложившимся за последние 20 лет. Для последующих работ необходимо учитывать резкие изменения координат пунктов в результате землетрясения, в первую очередь попадающих в 1000-километровую зону.

В результате анализа выявлена зависимость уменьшения косейсмических смещений земной коры при удалении от эпицентра землетрясения на расстоянии от 150 до 1800 км.

# Использованная литература

*Reilinger R.E., Hamburger M.W., Prilepin M.T, Guseva T.V.* Epoch Geodynamic GPS Measurement Across the Caucasus Collision zone (abstract). AGU. Fall Meeting. Program. Dec. 9-13. 1991. San-Francisco. California. 1991. Pp. 112.

*Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мельник Г.Э., Мокрова А.Н., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Розенберг Н.К.* Сопоставление деформационного поля и сейсмического потока территорий Крыма и Северного Кавказа в зоне коллизии Евразийской и Аравийской литосферных плит // Мониторинг. Наука и технологии. Общество с ограниченной ответственностью Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов (Махачкала), 2023. № 1, с. 6-15.

***Спасибо за внимание!***