

**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.



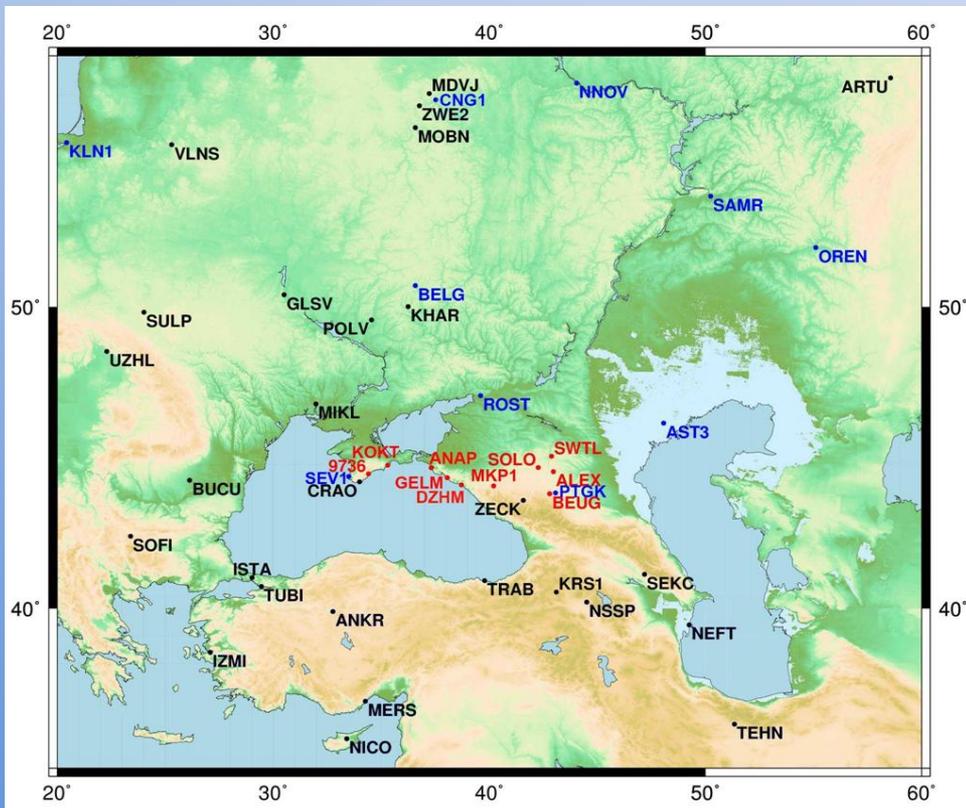
Карта двух основных сейсмических событий (звездочки) и роя последующих афтершоков магнитудой более 4 и схема расположения тектонических плит. Черными стрелками указаны направления движений Аравийской и Анатолийской плит

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

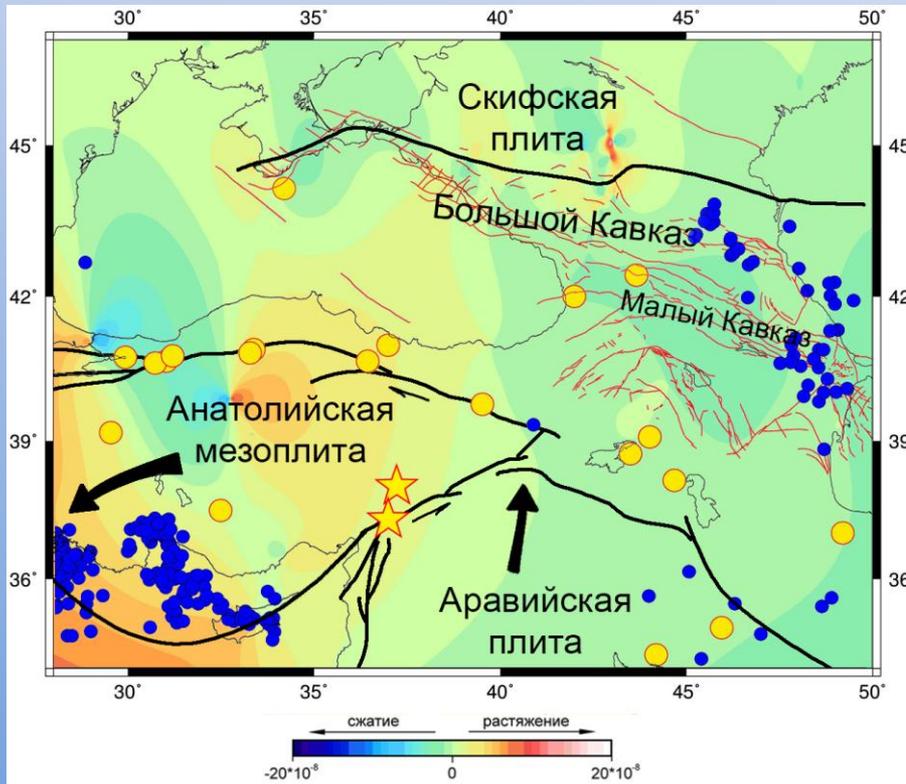


Схема расположения плит, оконтуривающих Крымско-Северокавказский регион. Черными стрелками указаны направления движений Аравийской и Анатолийской плит. Желтыми кружками показаны эпицентры сильнейших землетрясений за последние 100 лет, звездочками — эпицентры двух сильнейших турецких землетрясений 2023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



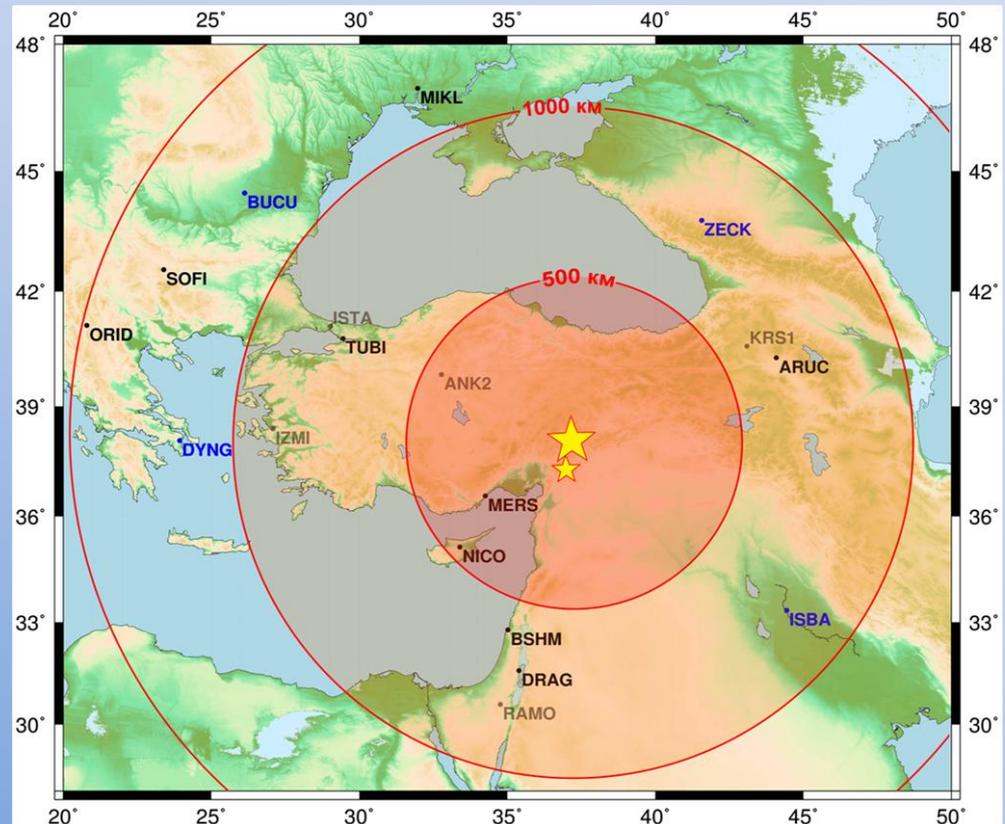
Станции IGS слева направо: ZECK , ARUC и IZMI

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

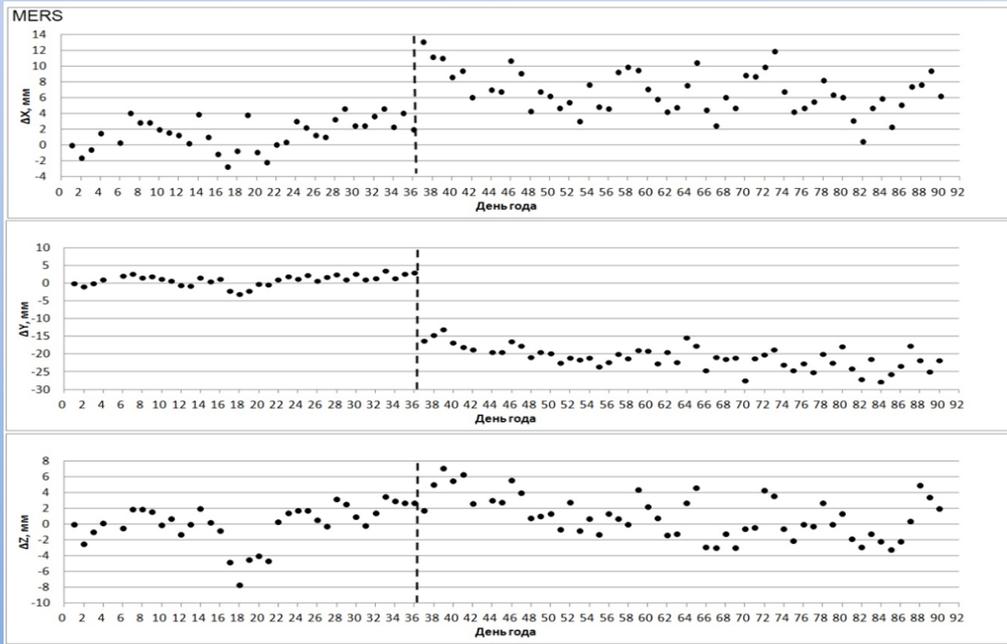
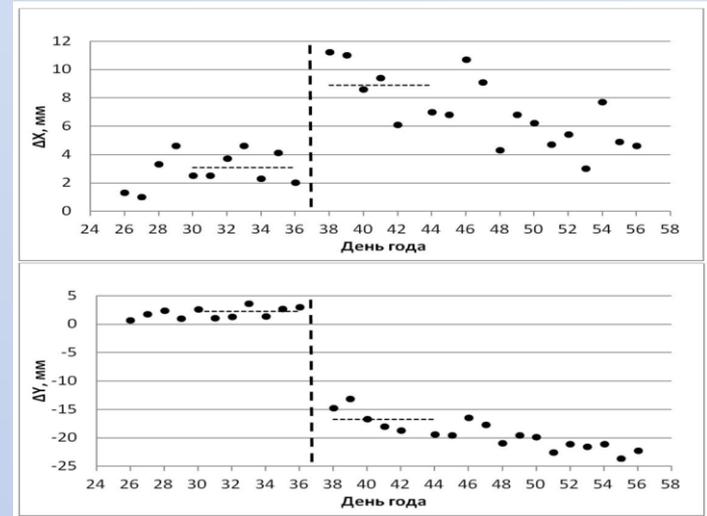


График изменения среднесуточных значений геоцентрических координат пункта MERS



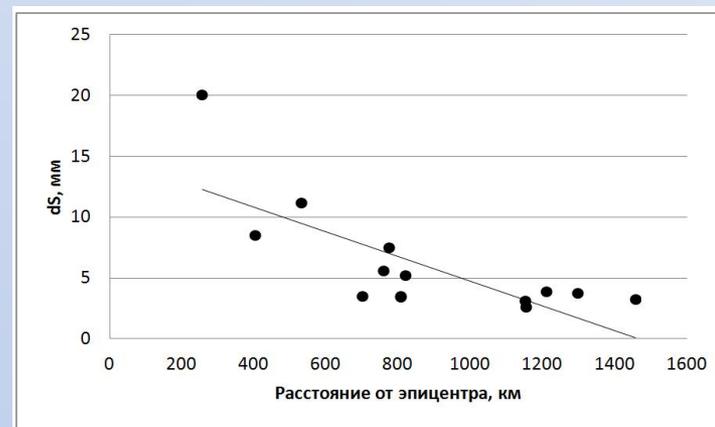
Фрагмент левого графика, соответствующий времени землетрясения (37 день года). Горизонтальными пунктирными линиями показаны усреднения координат до и после сейсмического события

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



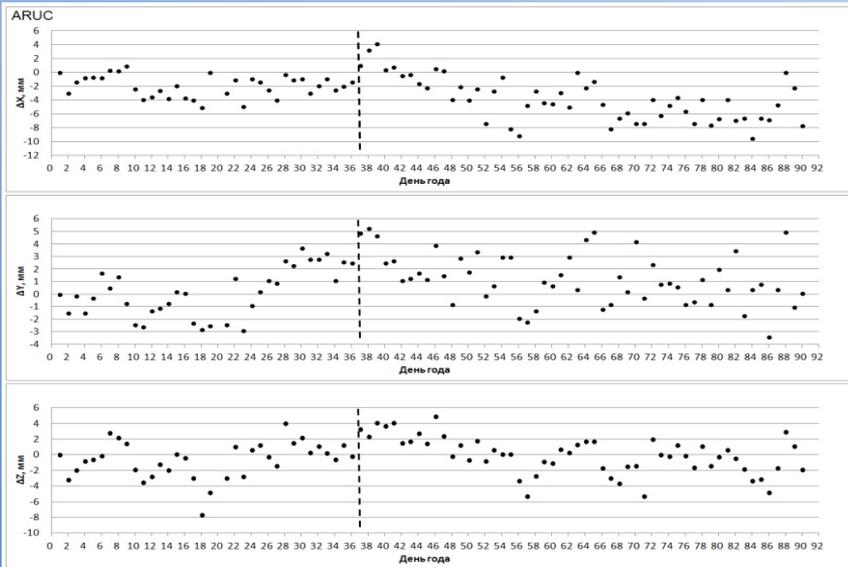
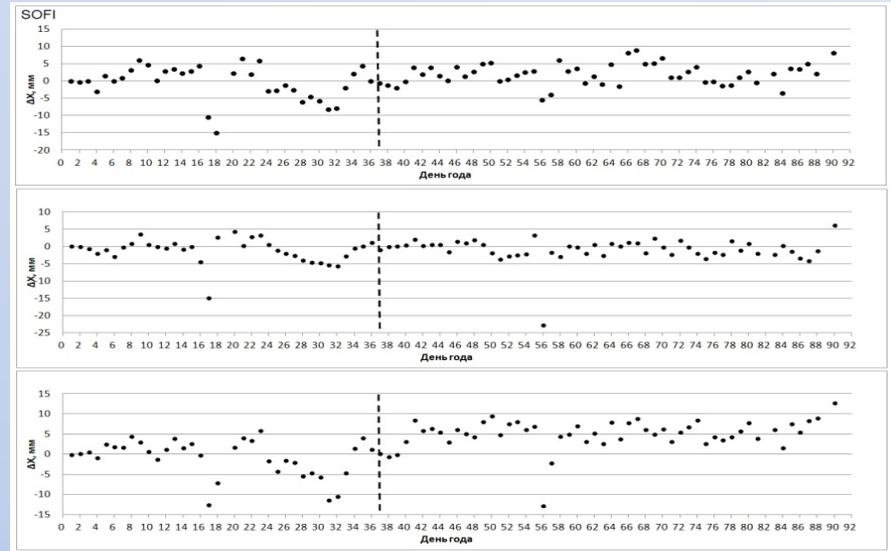
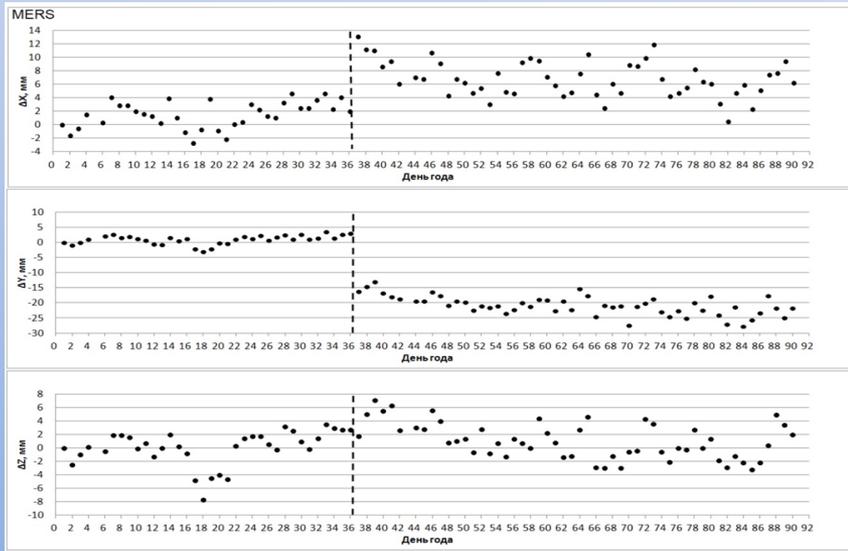
Зависимость изменения модуля полного вектора косейсмического смещения пунктов при удалении от эпицентров землетрясений

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

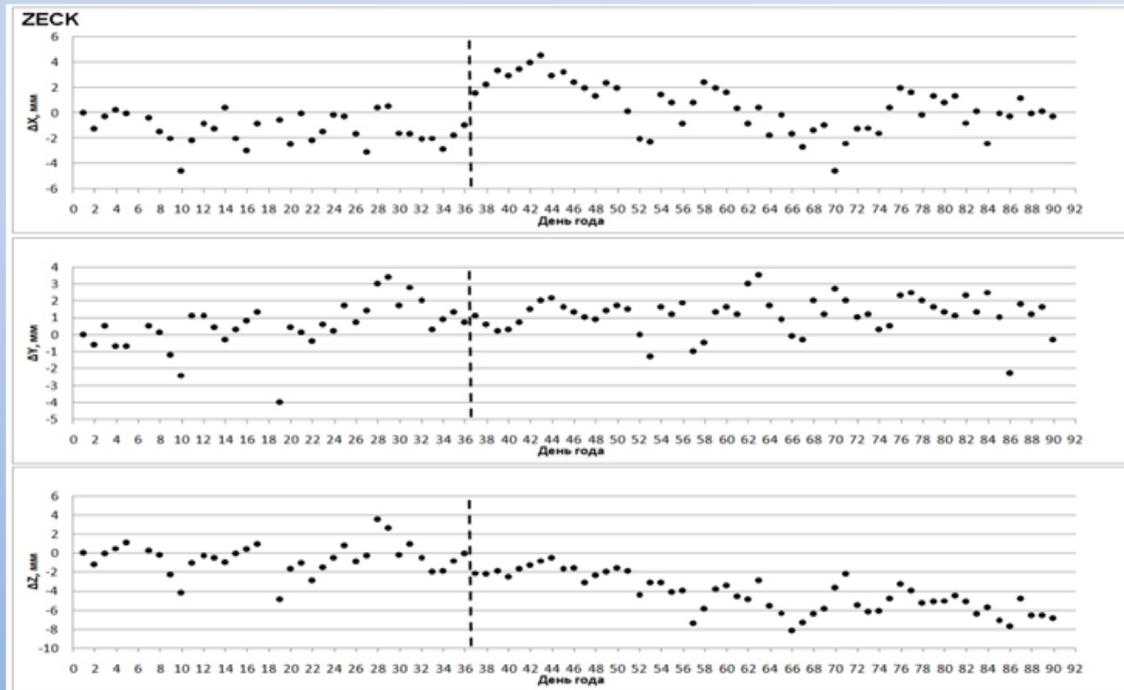
Изменение геоцентрических координат при удалении от эпицентров землетрясений



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;

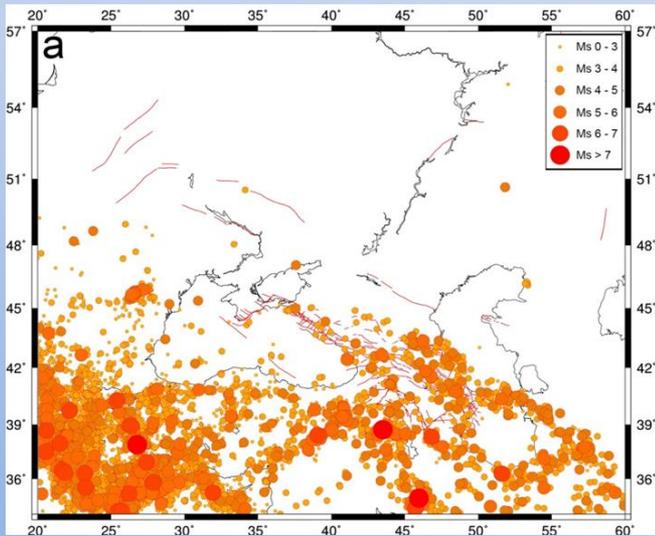
Изменение геоцентрических координат во времени



Пункт ZECK, являющийся опорным при обработке данных с пунктов Крымско-Северокавказского геодинамического 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).

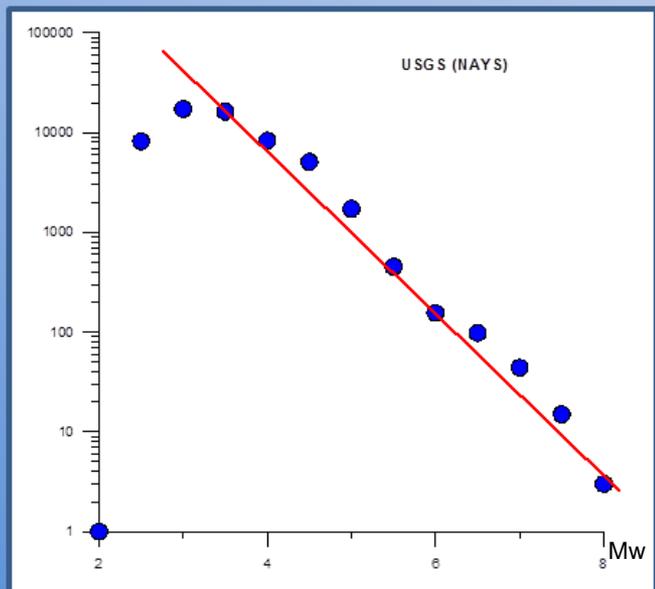
Анализ сейсмичности региона



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 $M_w \geq 6$.

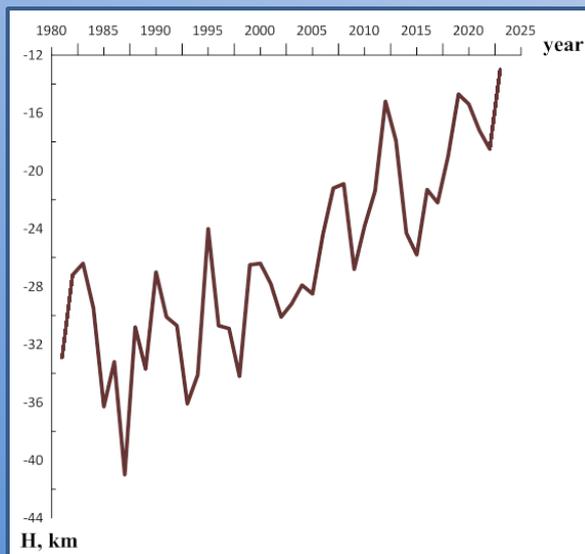
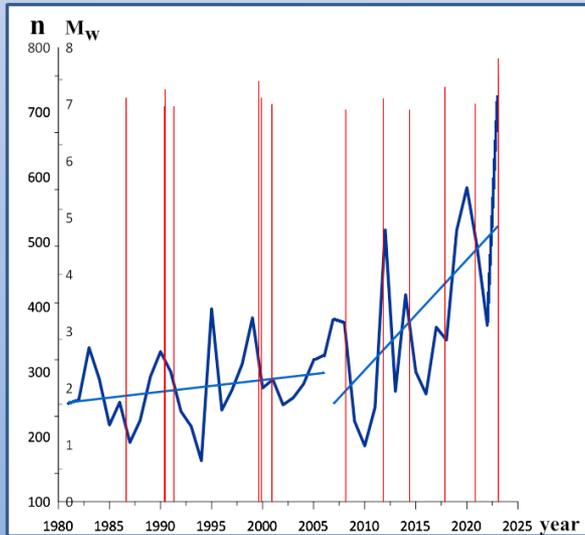
Карта эпицентров землетрясений за 2005-2022гг



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. Угловым коэффициентом 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 глубоким 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 ZESK, являющийся опорным при обработке данных с пунктов Крымско-Северокавказского геодинамического 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!