

Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)
16 - 20 ноября 2020 г. Москва

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н.

Лаборатория спутниковых методов изучения геофизических процессов
ИФЗ РАН, Москва

Северный Кавказ — это сложный геологический объект, развитие которого в настоящее время рассматривается как результат взаимодействия двух крупных литосферных плит — Евразийской и Аравийской. Ему свойственны образование складчато-надвиговой структуры с активными движениями земной коры, сложные системы разломов, вулканизм, повышенная сейсмичность.

Первые GPS наблюдения на территории Северного Кавказа были проведены сотрудниками ИФЗ РАН при участии американских специалистов после Рачинского землетрясения (Грузия) 29 апреля 1991 г. $M_s=7-7.2$. В последующие годы российская Северо-Кавказская сеть GPS была расширена и модифицирована, стала частью Среднеземноморской геодинамической сети по международному изучению деформаций Альпийско-Гималайского подвижного пояса и процесса проявления взаимодействия тектонических плит.



Задачи исследования:

- 1) определение современных движений и деформаций земной коры Кавказского региона по данным спутниковых измерений в разных системах отсчета;
- 2) сопоставление скоростей современного деформационного поля с потоком сейсмической энергии в едином временном интервале (2004-2019 гг).



Местоположение пунктов, использованных в работе

В исследовании использованы результаты регистрации синхронных спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС за 2004-2019 гг с 50 пунктов, из которых 20 — являются постоянно действующими станциями Международной геодинимической сети (IGS), данные которых в качестве базовых-референчных, взяты из открытых банков данных (cddis.nasa.gov, sopac.ucsd.edu). На остальных пунктах повторные измерения GPS/ГЛОНАСС выполнялись сотрудниками Лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ РАН.

Установка прибора на пункте GELM (Геленджик, морская гидрометеорологическая станция)



Специальная астрофизическая обсерватория РАН (пункт ZECK)



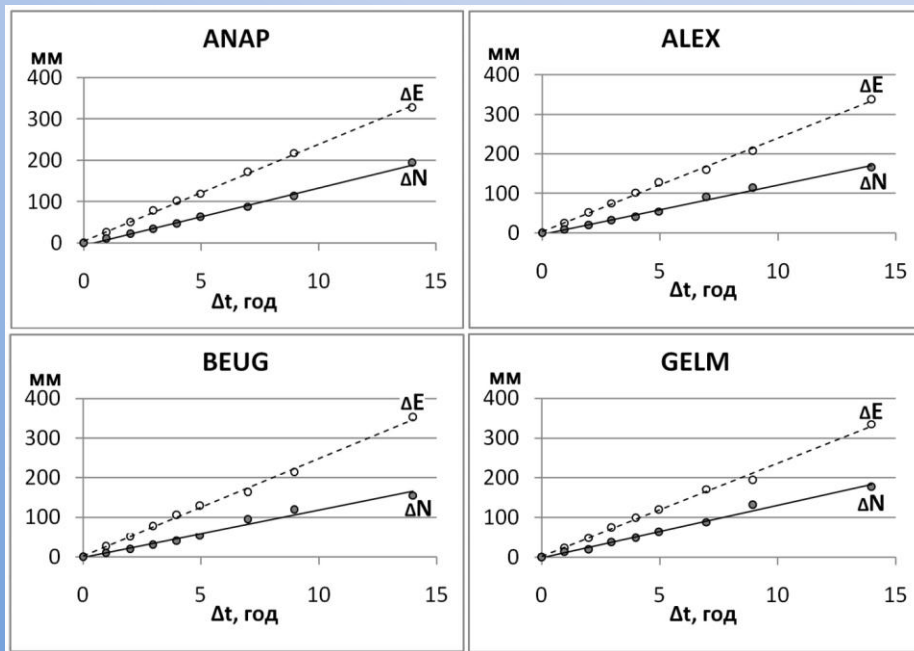
Прецизионные синхронные измерения GPS+ГЛОНАСС проводились ежегодно или каждые 2 года в сентябре, сериями по 4-20 суток с помощью двух системных двухчастотных приемников Javad Махор, с интервалом регистрации 30 с.

В результате выполнения повторных измерений и обработки с помощью программного комплекса Bernese, были определены среднесуточные и средние на эпоху геоцентрические и геодезические координаты пунктов в координатной системе ITRF для пунктов отдельных геодинамических сетей, причем в качестве опорных (перемещаемых во времени с постоянной скоростью) были выбраны ближайшие четыре станции мировой сети IGS (ZECK, BUCU, POLV, MDVJ).

Оценка точности определения координат, осредненных за измерительный цикл

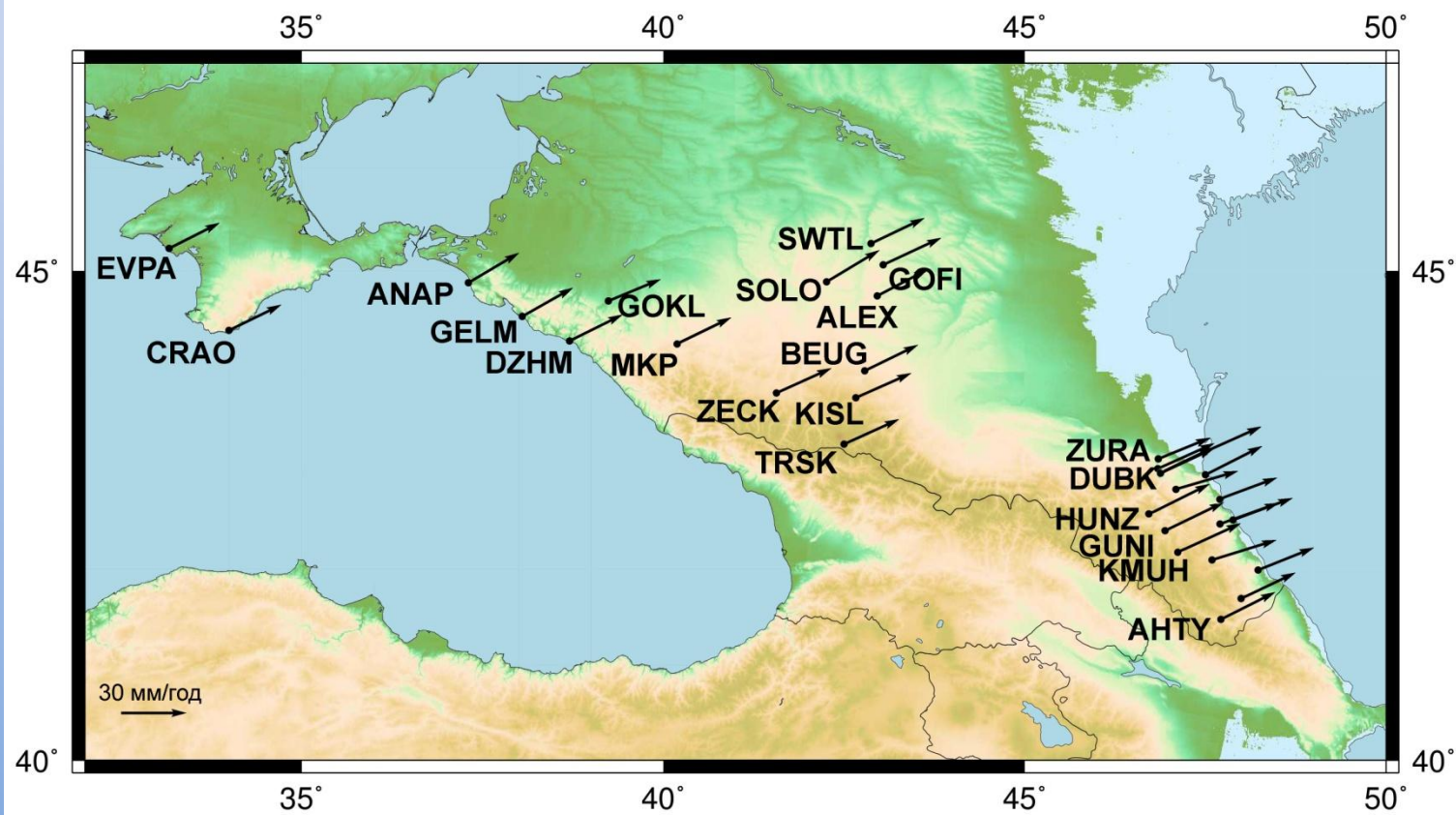
Графики временного хода компонент координат некоторых пунктов сети ИФЗ

Значения отклонений координат от линейного тренда (мм/год)



| ИФЗ | σ_n , мм | σ_e , мм |
|--------------|-----------------|-----------------|
| среднее | 0.4 | 0.5 |
| максимальное | 0.8 | 0.8 |
| | | |
| IGS | σ_n , мм | σ_e , мм |
| среднее | 0.1 | 0.1 |
| максимальное | 0.2 | 0.2 |

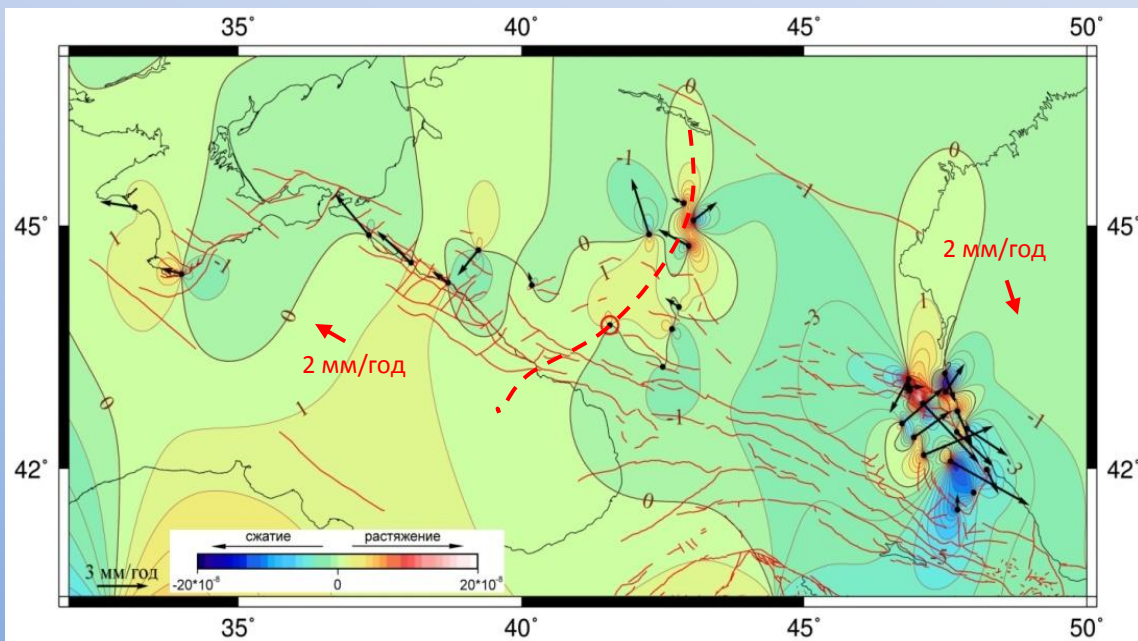
Скорости горизонтальных движений в ITRF



Карта скоростей горизонтальных (стрелки) движений Кавказа за период 2004-2019 гг. в ITRF по аппроксимированным данным

Векторы скоростей горизонтального смещения пунктов в координатной системе ITRF имеют северо-восточное направление, а их модули изменяются от 26 мм/год на западе до 34.5 мм/год на юго-востоке региона при максимальных значениях ошибок, не превышающих ± 2 мм/год, средних – ± 1 мм/год .

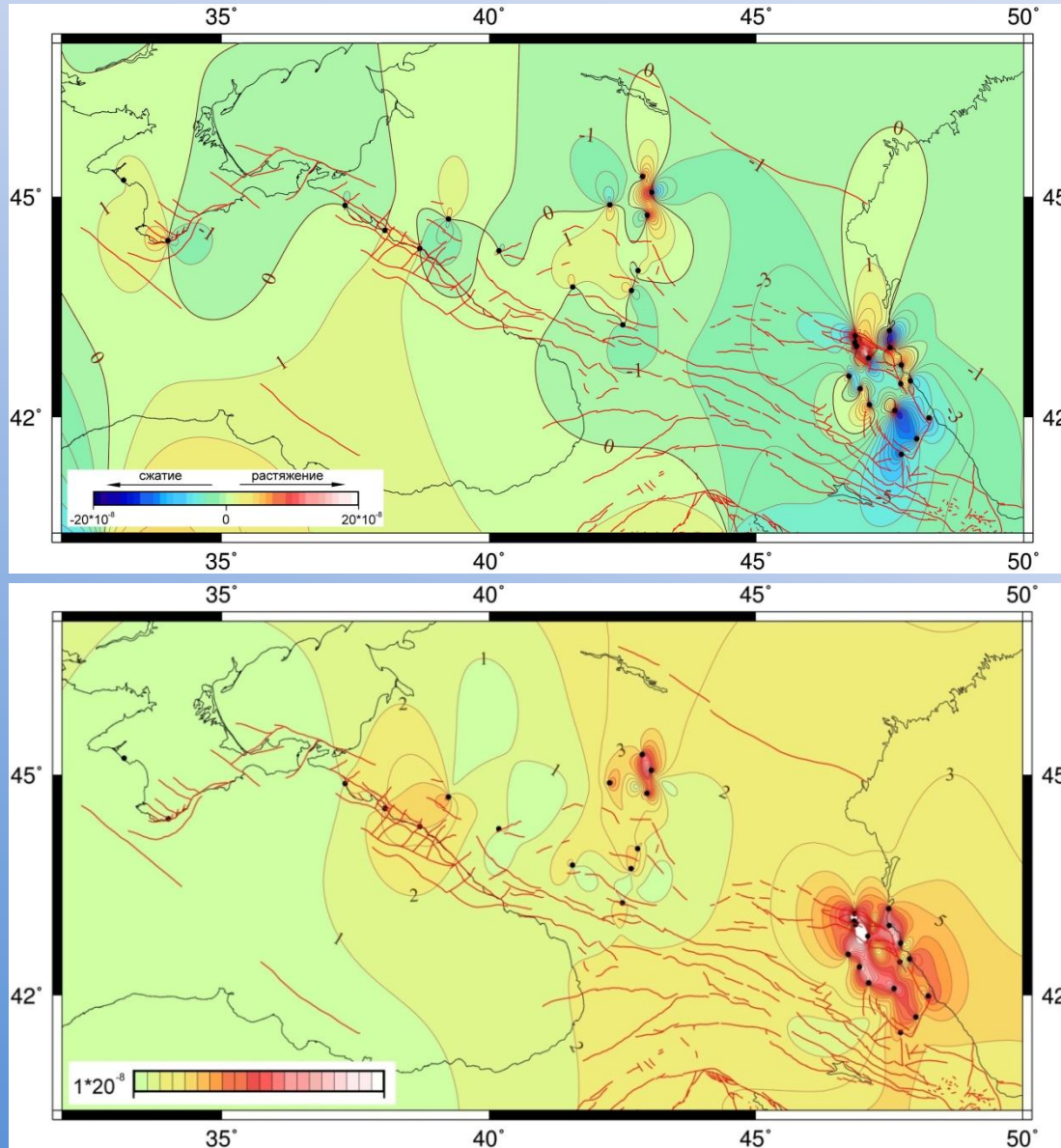
Распределение скоростей движения в региональной системе и площадных деформаций



| Пункт | Vn, мм/год | Ve, мм/год | Vs, мм/год | Аз, град |
|----------------------|-------------|------------|------------|------------|
| западнее ZECK | | | | |
| CRAO | -1,2 | 0,3 | 1,2 | 285 |
| EVPA | -2,0 | 0,3 | 2,1 | 279 |
| GOKL | -1,2 | -1,4 | 1,9 | 221 |
| ANAP | -2,0 | 2,3 | 3,1 | 319 |
| DZHM | -0,9 | 0,6 | 1,1 | 304 |
| GELM | -2,0 | 1,8 | 2,7 | 312 |
| MKP_ | -0,2 | 0,7 | 0,8 | 345 |
| SOLO | -1,0 | 3,2 | 3,3 | 342 |
| SWTL | -0,7 | 0,3 | 0,8 | 293 |
| Среднее | -1,3 | 0,9 | 1,9 | 300 |

| Пункт | Vn, мм/год | Ve, мм/год | Vs, мм/год | Аз, град |
|-----------------------|-------------|------------|------------|------------|
| восточнее ZECK | | | | |
| AHTY | 0,9 | 0,0 | 0,9 | 360 |
| BEUG | -0,8 | 0,5 | 0,9 | 302 |
| BUNK | -3,4 | 3,3 | 4,7 | 136 |
| CHAI | -2,1 | 0,9 | 2,2 | 157 |
| CNAL | 0,2 | -0,1 | 0,2 | 322 |
| DUBK | 0,0 | 1,0 | 1,0 | 90 |
| GOFI | 1,4 | 1,0 | 1,7 | 37 |
| GUNI | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 56 |
| HUNZ | 2,0 | 2,5 | 3,2 | 51 |
| KRMN | 0,6 | -1,7 | 1,8 | 160 |
| KISL | 0,3 | -0,1 | 0,3 | 161 |
| KMUH | 1,6 | 4,1 | 4,4 | 68 |
| KUBA | -2,5 | 4,6 | 5,3 | 118 |
| MAHA | 1,6 | 1,1 | 1,9 | 35 |
| OC08 | -0,1 | -0,2 | 0,3 | 239 |
| PRMA | -1,5 | 2,4 | 2,9 | 123 |
| RUKL | -1,4 | 0,7 | 1,5 | 153 |
| SERG | -2,0 | 2,1 | 2,9 | 132 |
| TRSK | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 77 |
| XXII | 0,1 | -0,5 | 0,5 | 280 |
| ZURA | -1,9 | -1,1 | 2,2 | 210 |
| ALEX | -1,8 | 0,9 | 2,0 | 297 |
| Среднее | -0,3 | 1,1 | 2,0 | 161 |

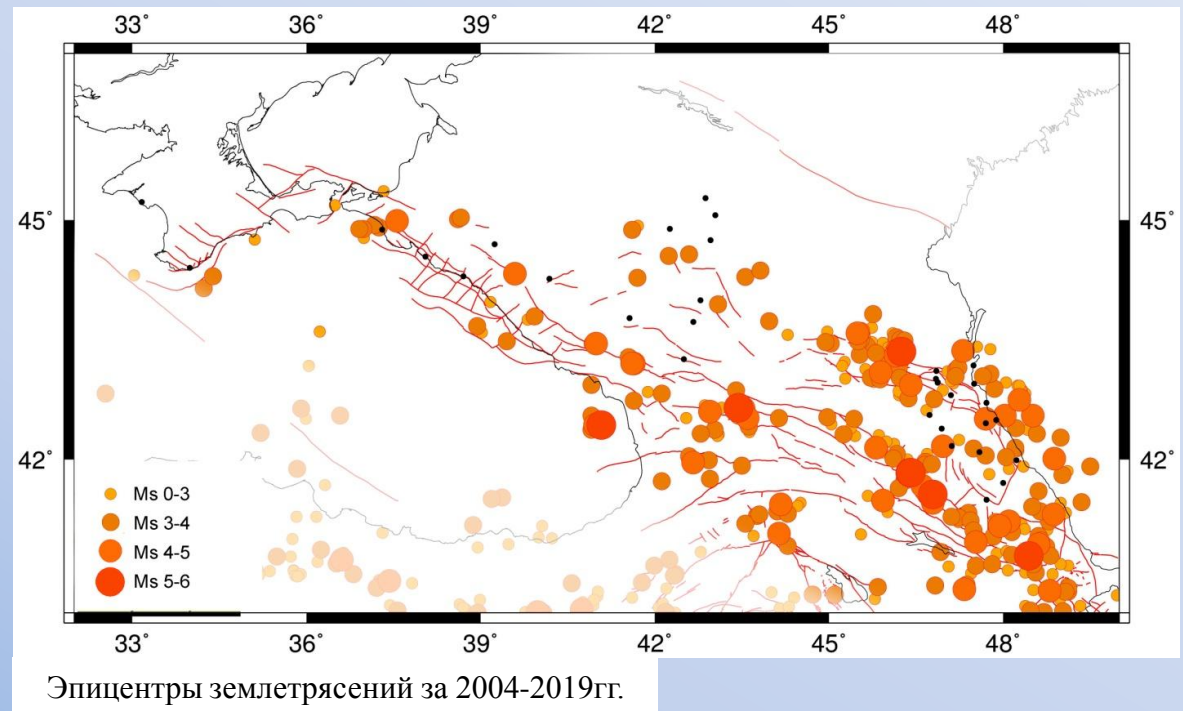
Распределение площадных деформаций, рассчитанных с использованием первого и второго инвариантов тензора деформаций



Современное напряженно-деформированное состояние земной коры выражается в распределении площадных деформаций сжатия и растяжения со средней скоростью $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ с аномалиями сжатия $-3 \cdot 10^{-7}$ и растяжения $5 \cdot 10^{-7}$

Сейсмичность

Для оценки сейсмической активности региона использовались данные каталога землетрясений, предоставляемые Геологической службой США (USGS). В пределах рассматриваемой территории с 2004 г. по 2019 г. было зафиксировано 523 сейсмических события с магнитудами M_s до 5.72 (средняя магнитуда - 3.02, средняя глубина - 19.58 км. Наиболее сильное событие с $M_s=5.72$ (13 класс) 07.09.2009 г с глубиной $h=15$ км, $42.66N$, $43.44E$ (край Рача-Лечхуми и Квемо-Сванети, Грузия).

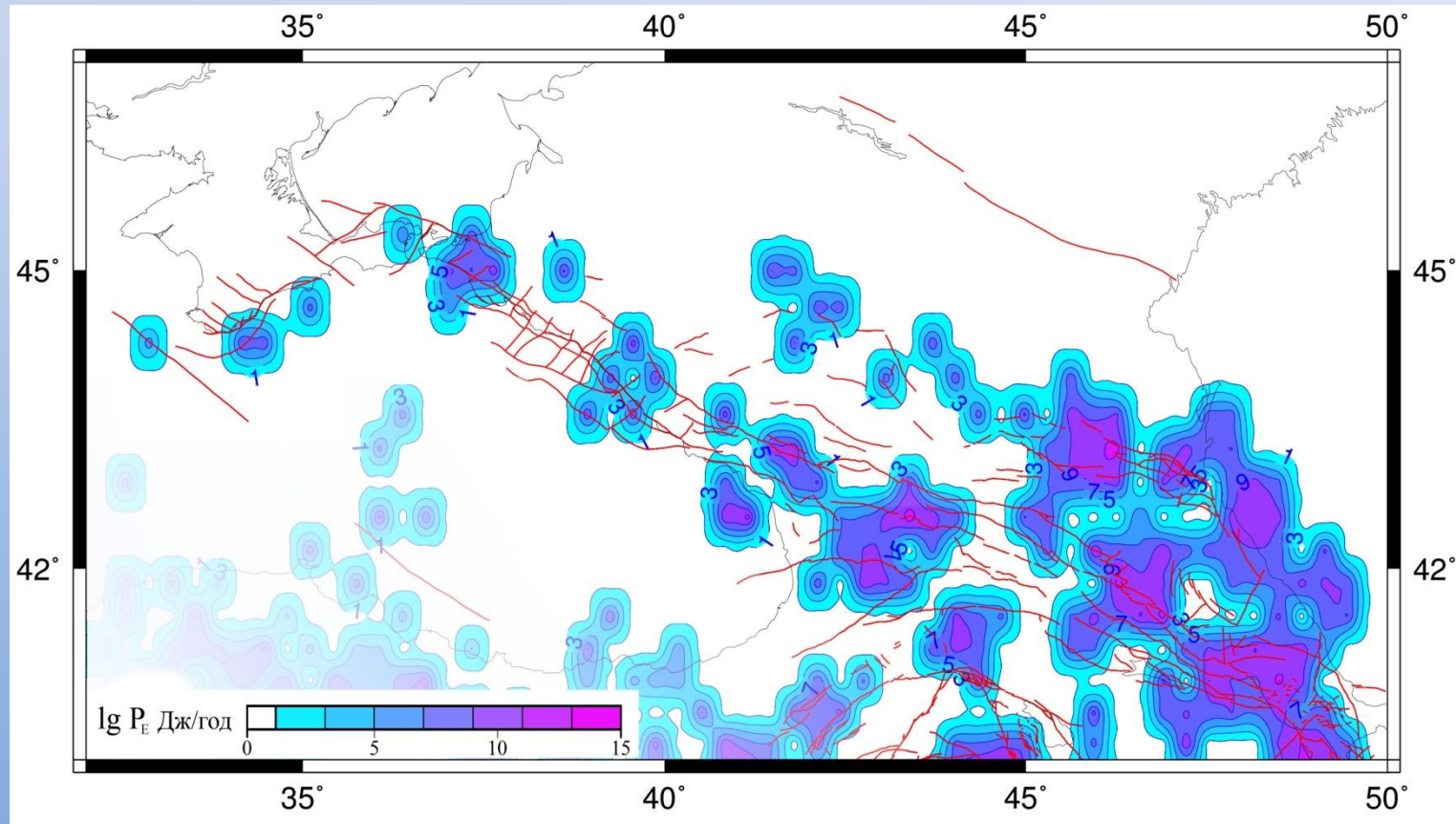


Для оценки выделившейся энергии землетрясений использовано соотношение Гутенберга-Рихтера:

$$\lg E = 1.5 \cdot M_s + 4.8.$$

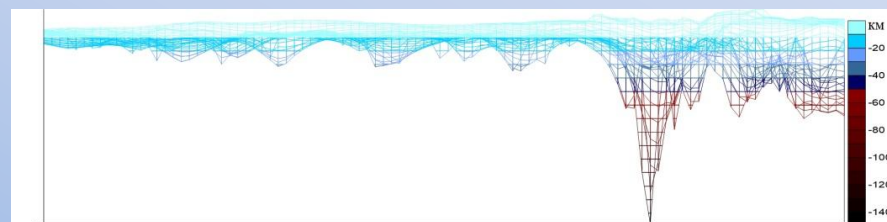
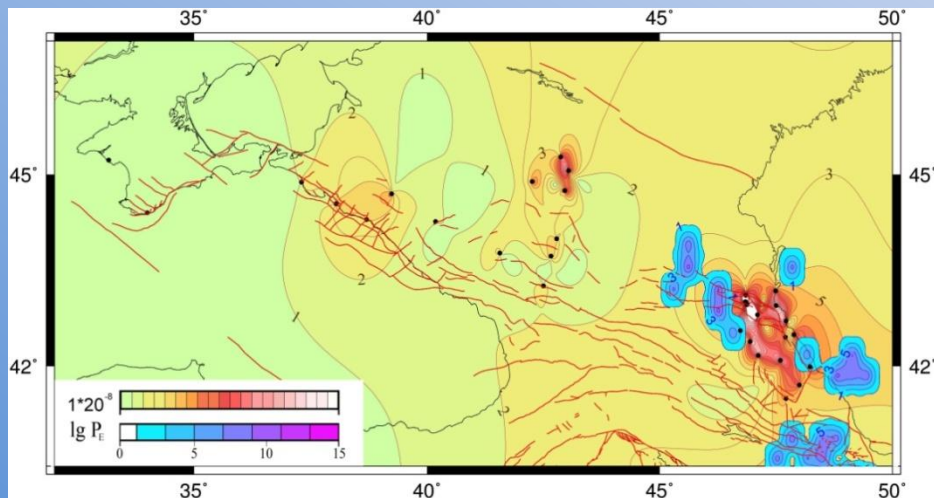
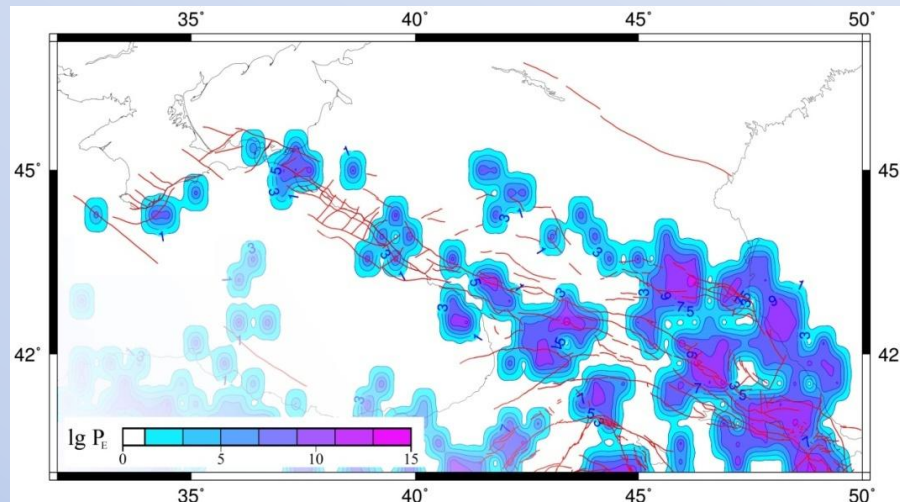
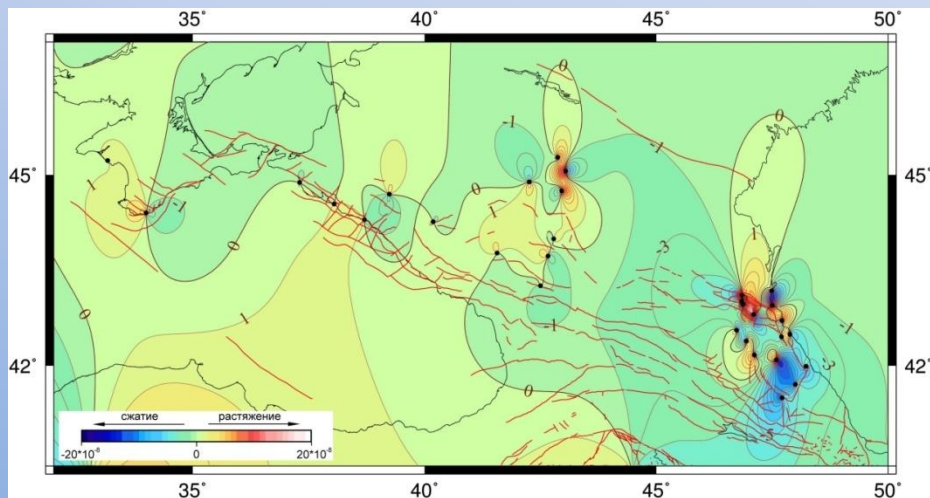
Территория была разбита на ячейки по 1000 км^2 , для каждой из которых проведено суммирование сейсмической энергии всех землетрясений за 2004-2019 гг. Полученные суммарные среднегодовые значения присвоены центру каждой ячейки. Рассчитан поток сейсмической энергии P_E в Дж/год.

Площадное распределение потока сейсмической энергии



За рассматриваемый период величина потока сейсмической энергии в среднем составляет $10^9 \div 10^{11}$ Дж/год. Максимальное значение потока сейсмической энергии ячейки составило 10^{12} Дж/год. Наиболее активными являются центральная и восточная области Большого Кавказского хребта и территория Дагестана, где зафиксированы самые глубокие подкоровые (55-200 км) очаги землетрясений

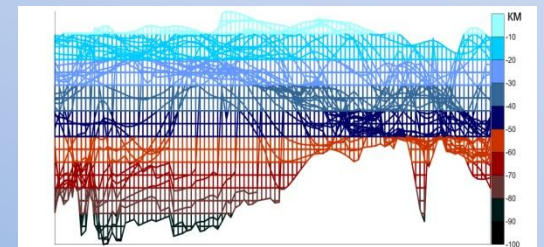
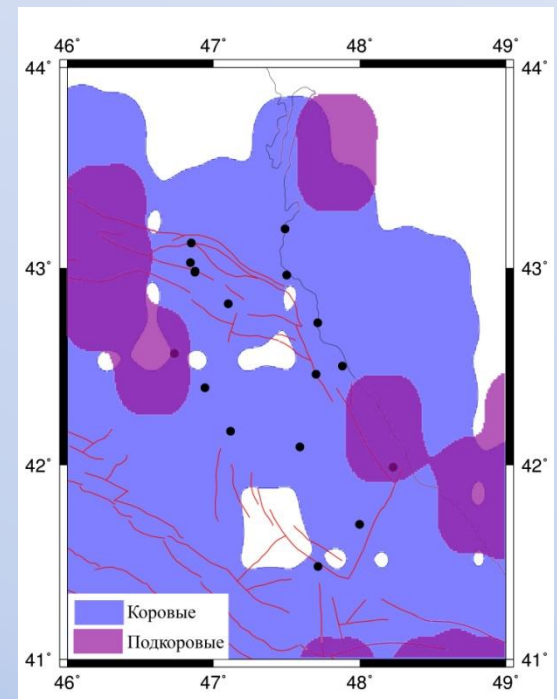
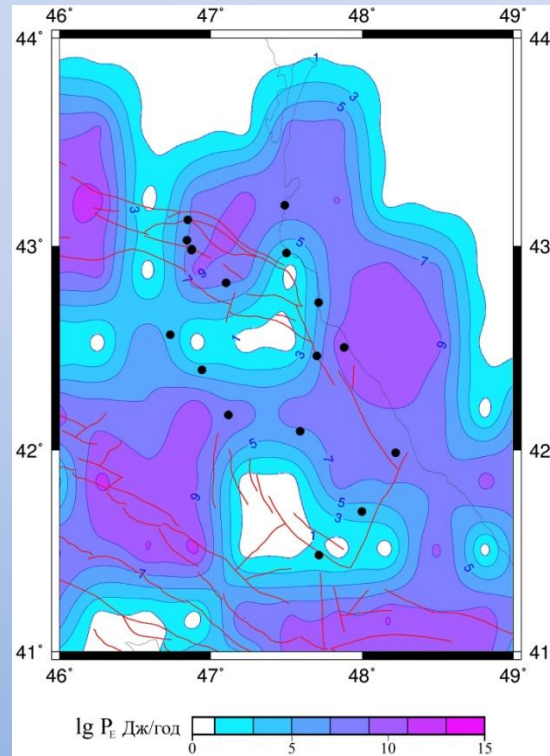
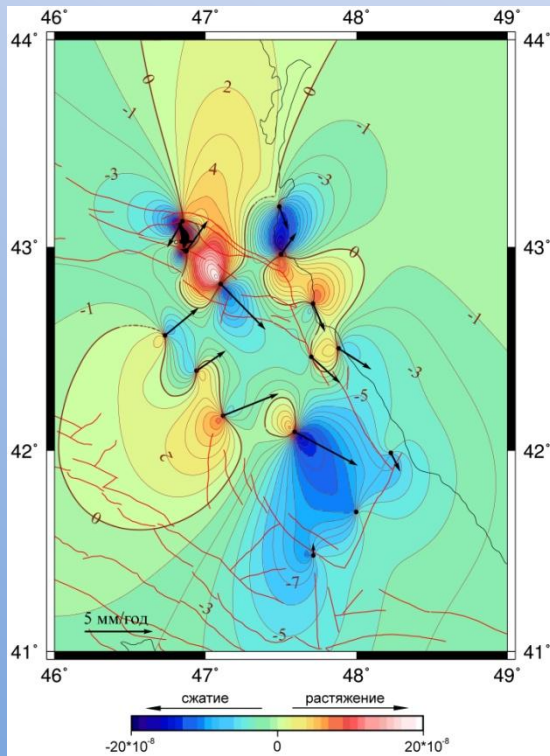
Сопоставление распределения площадных деформаций и выделившейся сейсмической энергии



Геодинамическая сеть Дагестана



Распределение площадных деформаций, и сейсмического потока на территории Дагестана



Выводы

Увеличение количества пунктов геодинимической сети на Северном Кавказе позволило расширить территорию, для которой с помощью спутникового мониторинга достоверно определяются скорости с точностью 1 мм.

Участки аномального сжатия и растяжения, возможно, обусловлены воздействием внутренних локальных факторов.

Обсуждаемые результаты дают количественные оценки средних и аномальных скоростей горизонтальных движений и площадных деформаций в сопоставлении с величиной сейсмического потока.

Такой подход значительно расширяет знание о геофизической и геодинимической обстановке в регионе и отражает количественное влияние более подвижной Аравийской тектонической плиты на современное развитие Кавказского региона.

