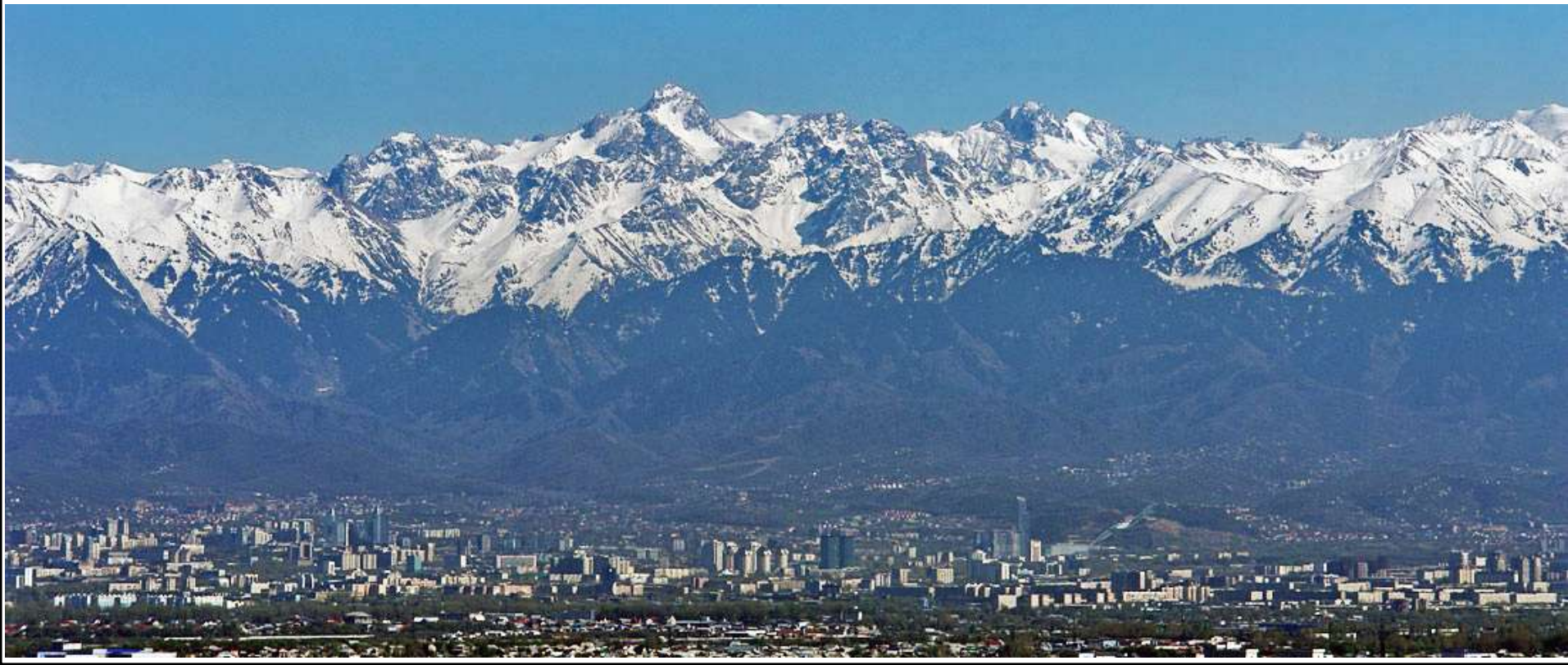


МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

Виляев А.В., Жантаев Ж.Ш.

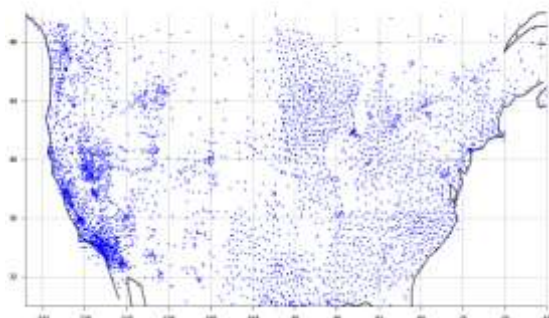
*Институт ионосферы, Национальный Центр космических исследований и технологий,
Казахстан, г. Алматы, vilayev@gmail.com*

В Республике Казахстан геодинамические процессы исследуются средствами GPS-измерений на основе мониторинга поля скоростей СДЗК как для районов со сравнительно спокойной геодинамической обстановкой, так и для районов повышенной сейсмической активности. Привлекаются математические методы моделирования деформационного поля земной коры, дополняющие возможности технологии GPS.

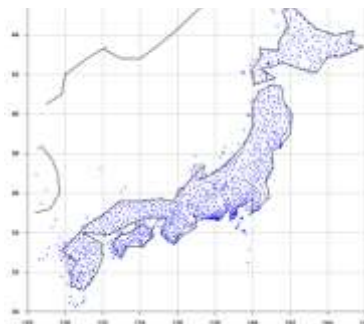


Состояние GPS исследований в РК

Сеть 4811 станций GPS в США



Сеть 1312 станций GPS в Японии



Иллюстрации - А.А. Любушин «Поле когерентности шума GPS как инструмент оценки текущей сейсмической опасности» (2016)

В настоящее время мировая сеть станций насчитывает более 10 тысяч пунктов по всему земному шару. Наиболее полно представлен регион США (более 6000 или 1 GPS на 1.3 тыс. кв.км), Японии (более 1600 или 1 GPS на 200 кв.км).

В Казахстане существует проблемное отставание в этом направлении от мировых исследований (1 GPS на 50,4 тыс.кв.км), ограниченное до недавнего времени отсутствием сети GPS станций на всю территорию.

С 2016 г. АО «НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», АО «Leica Geosystem Kazakhstan», ТОО «TRIMBLE GEOTRONICS» введена в эксплуатацию сеть высокоточной спутниковой навигации (СВЧН РК) из 112 GPS станций.

Сеть предназначена для решения геодезических задач в строительстве и в других областях народного хозяйства.

GPS станции СВЧН размещены в наиболее крупных городах, а также на некоторых нефтяных месторождениях.

В городской черте пункты размещены на крышах зданий, что снижает точность наблюдений из-за влияния собственных колебаний сооружений.

Используются сертифицированные приемники нового поколения LEICA GR10, LEICA GR30, TRIMBLE 4000SSE, TRIMBLE NETR9 с интервалом регистрации 30 с.

Сбор, передача и архивирование данных осуществляется по каналам GSM связи на серверах обслуживающих организаций.

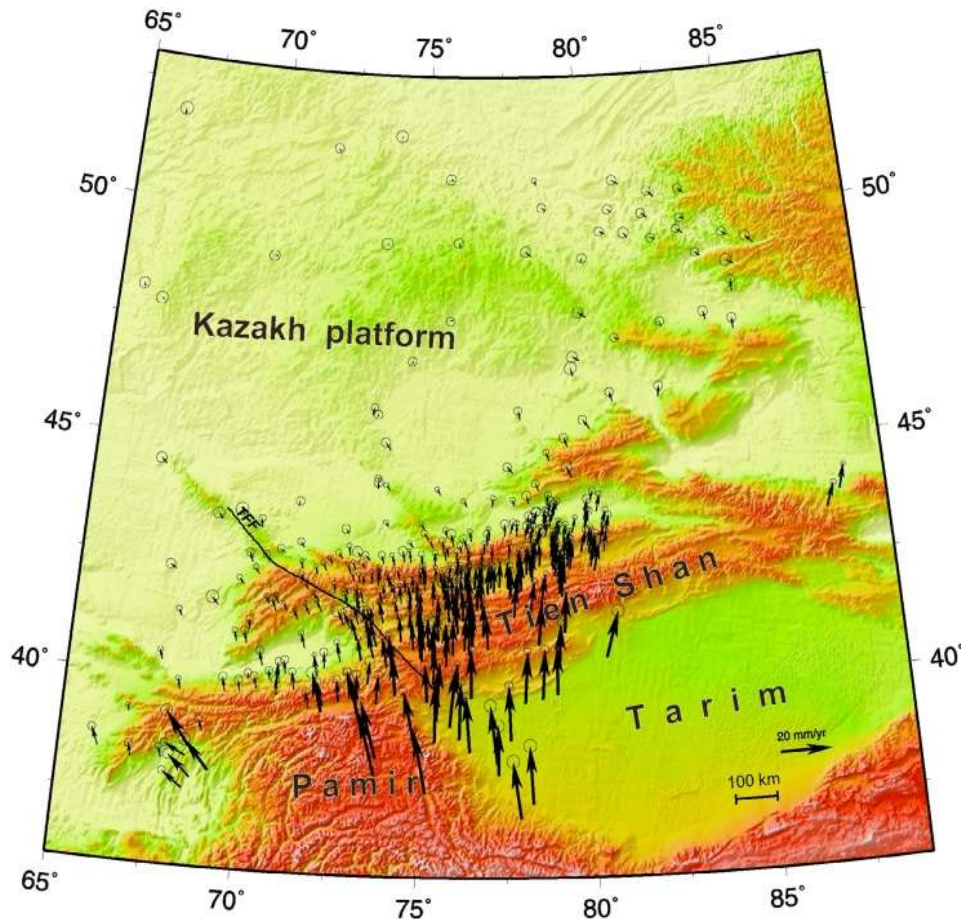
Сеть GPS станций СВЧН РК



Первый этап развития GPS сети

Изучение геодинамических процессов с привлечением GPS технологий необходимо для развития методов прогноза сильных землетрясений. В Казахстане существует проблемное отставание в этом направлении от международных исследований, ограниченное до недавнего времени отсутствием сети GPS станций на всю территорию.

Карта векторов скоростей первого этапа GPS сети Центрально-Азиатского региона, вычисленных относительно Евразии



Zubovich A. et.all. (2010)

Впервые применение методов спутниковой геодезии на территории Казахстана началось в 1992 г. в связи с выполнением международных проектов по созданию сети GPS измерений в кыргызском и казахском Тянь-Шаньском регионе.

Задача состояла в определении скоростей современных движений земной коры (СДЗК) Тянь-Шаня.

Ученые Института сейсмологии Кыргызстана, Института сейсмологии Казахстана и Института астрономии Узбекистана, а также сотрудники геодезических служб, установили первые 40 пунктов на территориях этих стран.

- ✓ Векторы скоростей имеют преимущественно меридиональное направление, а их величины убывают с юга на север. Инструментально подтверждено сокращение земной коры Центрального Тянь-Шаня со скоростями 11-13 мм/год в процессе столкновения Индийской и Евразийской плит,
- ✓ Казахская платформа относительно Евразии остается стабильно неподвижной и не испытывает значимых внутренних деформаций. В пределах Джунгарского Алатау скорости СДЗК уменьшаются до 1-3 мм/год для блоков земной коры.
- ✓ Значительные амплитуды градиентов в поле скоростей присутствуют между южным и северным окончаниями оз. Иссык-Куль, а также на северной границе Тянь-Шаня по Заилийскому разлому, где он ограничивает бассейн Илийской впадины.
- ✓ В восточной части Казахстана отмечены незначительные (по сравнению с Тянь-Шанем) скорости СДЗК, возрастающие к северу в российской части Алтая.

Второй этап развития Казахстанского сегмента GPS сети

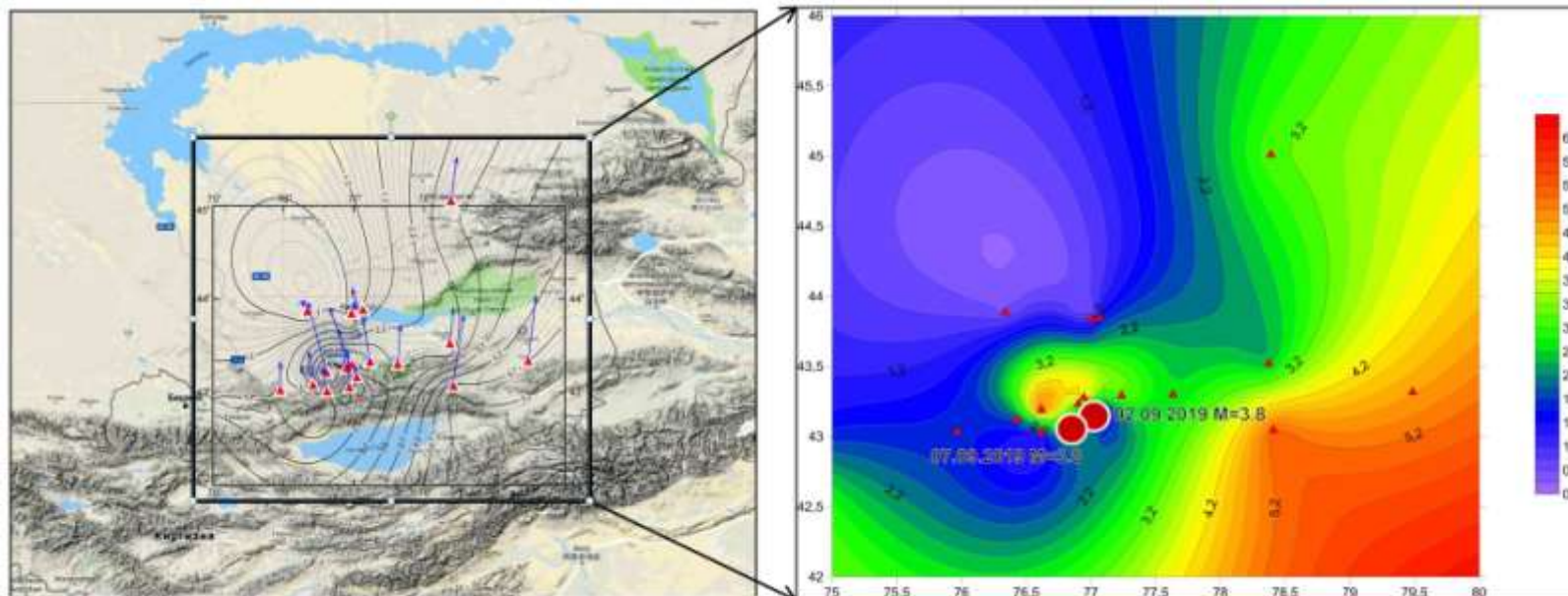
Начался в 2005 г. и продолжается с участием ДТОО «Институт ионосферы» и АО «Институт сейсмологии» с установки 10 GPS станций непрерывного режима наблюдений в сейсмоопасном районе Юго-Восточного Казахстана. Основной задачей исследований, помимо определения СДЗК, является изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры Северного Тянь-Шаня и выявление связей между процессами деформирования и сейсмичностью.

GPS станции расположены в 9-ти балльной сейсмической зоне в районе хребта Заилийский Алатау, а также в переходной области к асейсмичной части Казахского щита. Они совмещены с сетью сейсмостанций, что решает проблему охраны оборудования, энергообеспечения и передачи информации через спутник в центр приема и первичной обработки.

Измерения выполняются двухфазными GPS приемниками LEICA GPS1200, TRIMBLE 4000SST, ROGUE SNR-8000.

Дискретность отсчетов составляет 30 с. Обработка данных осуществляется комплексом GAMIT/GLOBK. Среднесуточные решения объединяются в системе координат ITRF14_EURA с измерениями более 20 станций мировой IGS сети. Точность определения координат за период 2009-2017 гг. составила в плане 0.3 мм, по высоте 3.6 мм.

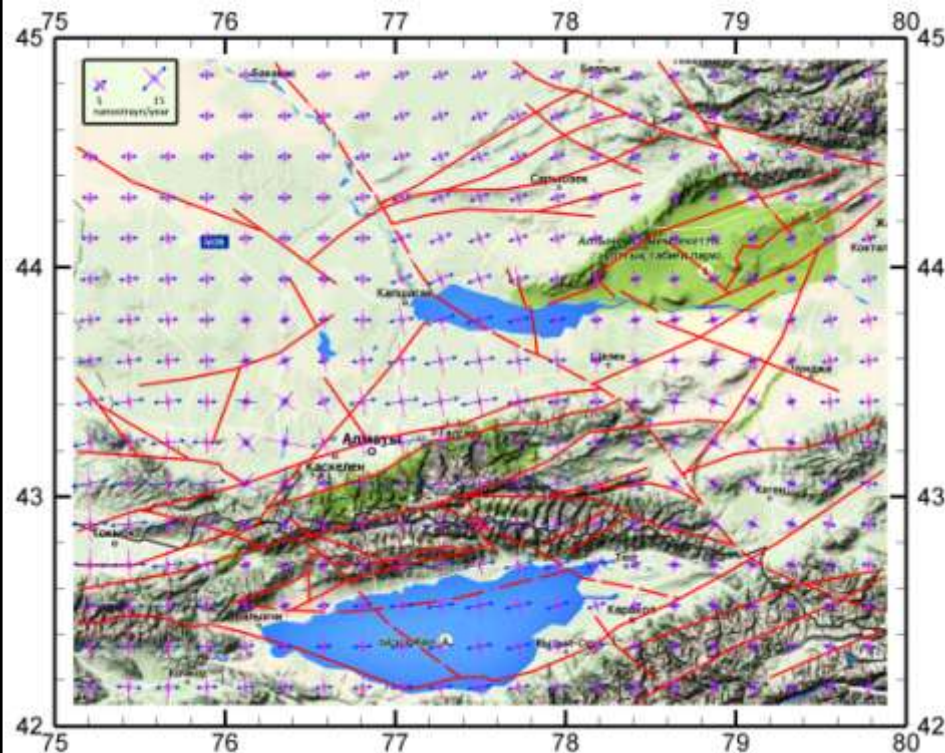
Вектора скоростей горизонтальных движений Алматинского сейсмополигона (слева) и схематическая карта в сечениях изолиний 0.5 мм/год (справа). Красный круг - эпицентры землетрясений: 02.09.2019 M=3.8 и 07.09.2019 M=3.8



Основные результаты изучения GPS геодезией сейсмоактивного региона

Компоненты скорости смещений были интерпретированы как составляющие тензора деформаций. Земная кора аппроксимирована моделью сплошной однородной среды, т.е. соответствующая закону Гука. Рассчитывались параметры НДС: амплитуда главных компонент тензора деформаций, модули максимальной сдвиговой деформации и растяжения, критерий Мора-Кулона и др.

Оси главных деформаций Северного Тянь-Шаня с тектоническими разломами

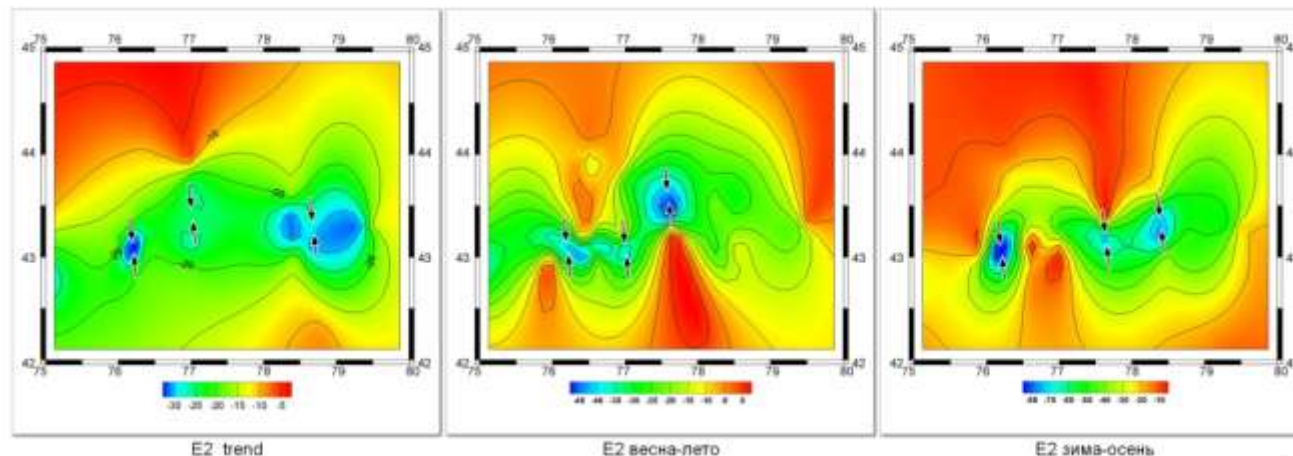


- ✓ Горизонтальные деформации сжатия обуславливают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север до 30×10^{-9} .
- ✓ В центральной части проявляются девиаторные растяжения, ориентированные в целом субширотно с амплитудами до 20×10^{-9} . В пределах западной части хребта Заилийский Алатау и в сочленении хребта с Жетысуйском Алатау на востоке выделены блоки земной коры, находящиеся в режиме всестороннего сжатия до 20×10^{-9} .
- ✓ Ориентация осей главных деформаций коррелирует с глубинными тектоническими разломами.
- ✓ Направление линейных растяжений преимущественно субширотное в пределах центральной части Северного Тянь-Шаня.
- ✓ Направление сжимающих деформаций меняется от северо-восточной на западе к северо-западной на восточном фланге.

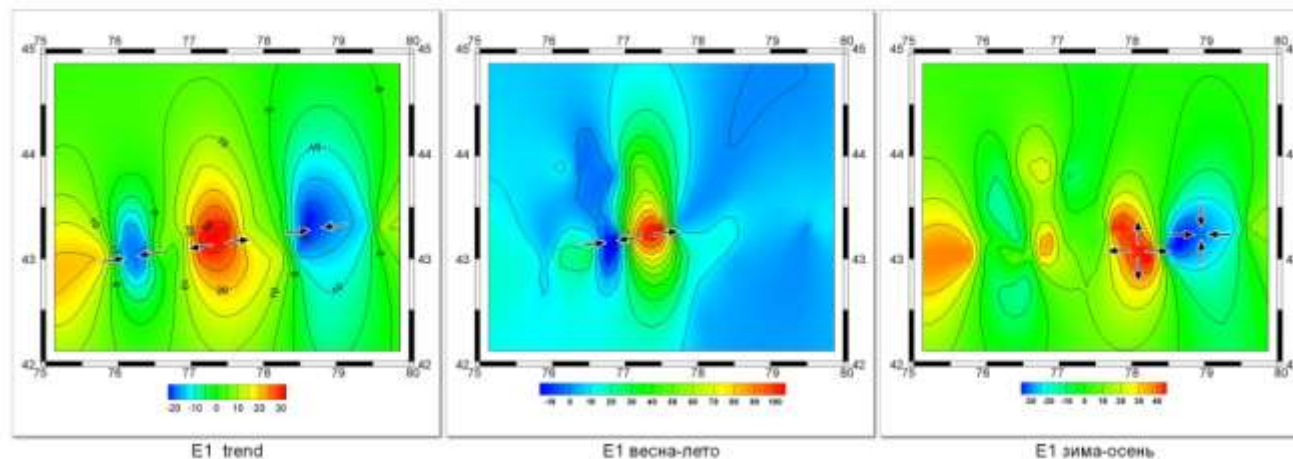
Динамика сезонных вариаций главных деформаций земной поверхности Северного Тянь-Шаня

Деформации одноосного сжатия (слева направо): 1 - региональный тренд, 2 – весна-лето, 3 – зима-осень; деформации одноосного растяжения: 4- региональный тренд, 5 – весна-лето, 6 – зима-осень (стрелки – направления сжатия-растяжения)

Вариации поля главной компоненты $e_2 \times 10^{-9}$ (одноосное сжатие)



Вариации поля главной компоненты $e_1 \times 10^{-9}$ (одноосное растяжение)

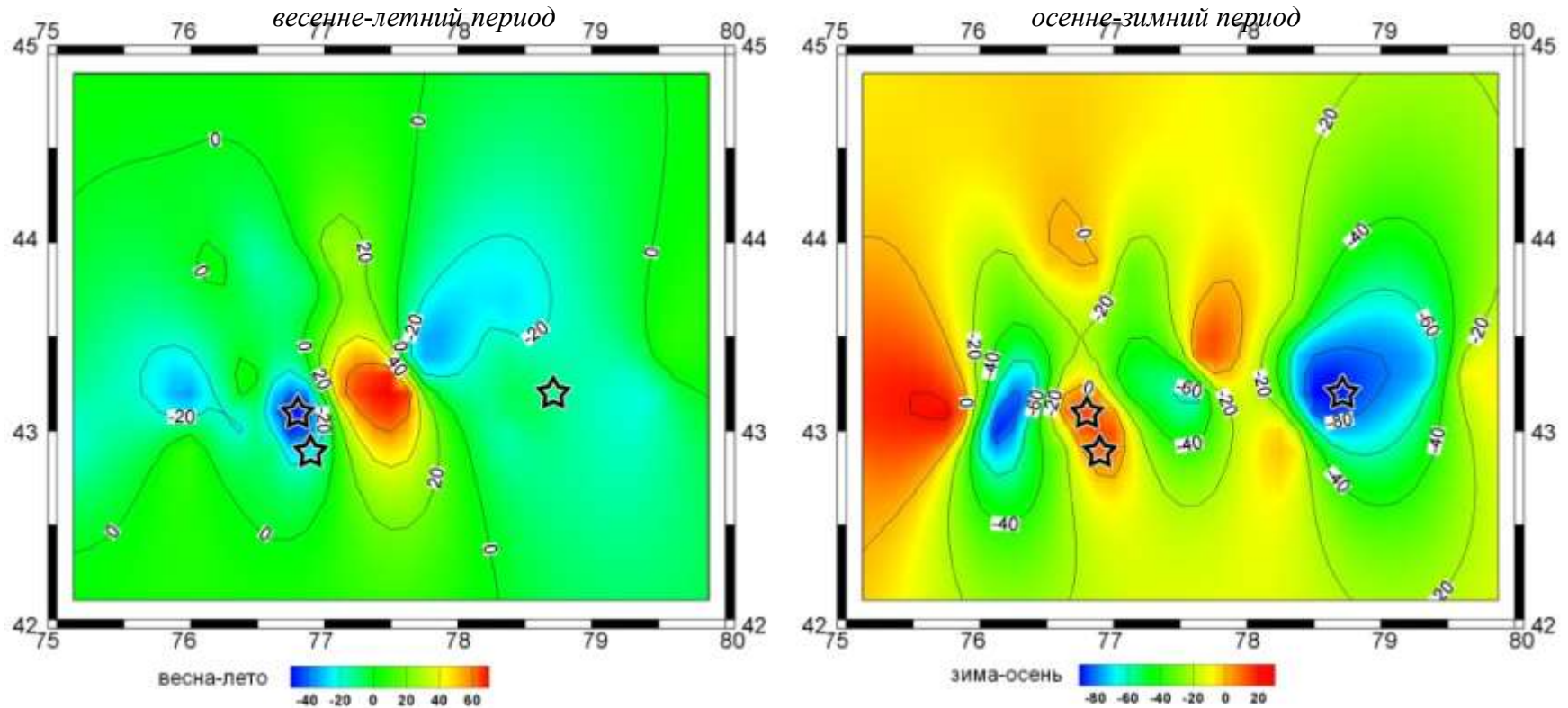


Сезонные изменения СДЗК Северного Тянь-Шаня обусловлены атмосферной циркуляцией (в основном холодных фронтов Сибирского антициклона) и орографическими особенностями поверхности. В холодное время года преобладают ЮЗ направления горизонтальных смещений, в теплое – СВ.

- ✓ Годичный перепад скоростей достигает 8 мм/год
- ✓ Амплитуды деформаций расширения отдельных областей изменяются в два и более раза.
- ✓ При этом региональная субширотная ориентация оси сжатия сохраняется

Динамика вариаций растяжения – сжатия поверхности

отражает природное напряженное состояние горной среды во времени



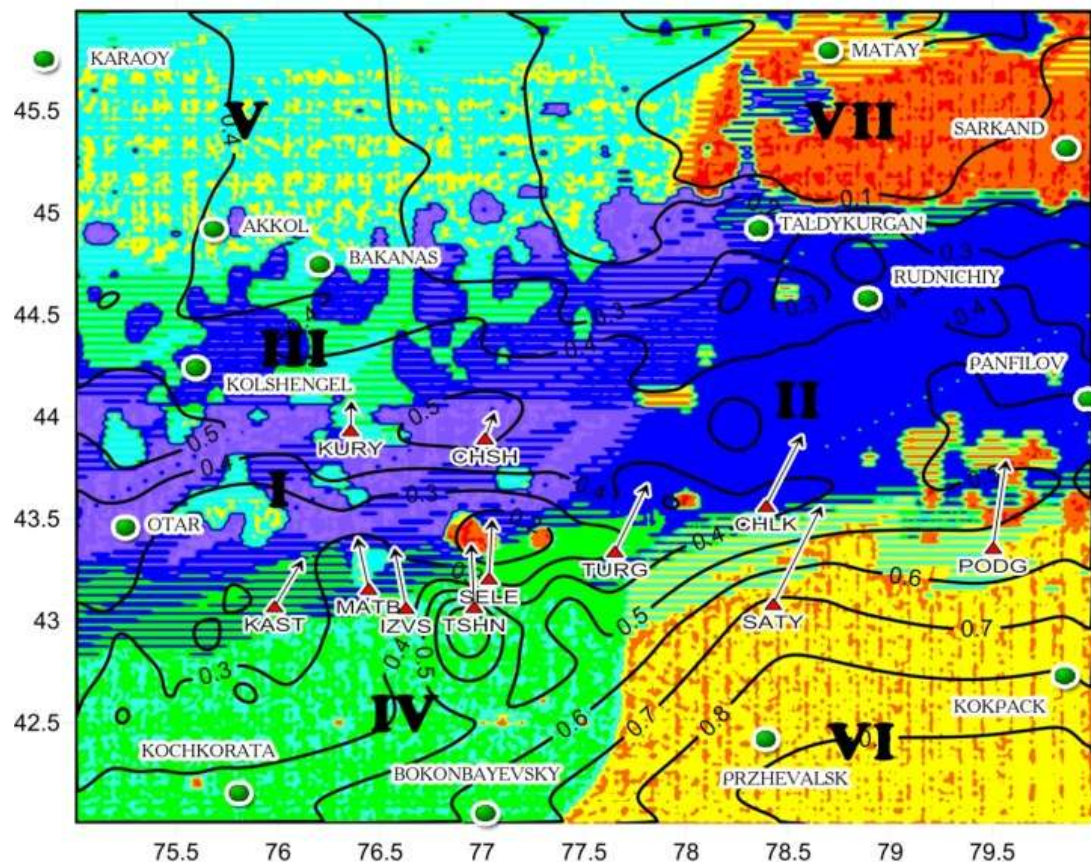
- ✓ Сезонные вариации деформаций поверхности фиксируются по измерениям GPS станций.
- ✓ Могут быть использованы для среднесрочного прогноза.
- ✓ Также могут рассматриваться как триггерный механизм возникновения землетрясений.

Районирование сейсмоактивного региона юго-восточного Казахстана

Подбор геолого-геофизических параметров, адекватно и пространственно равномерно описывающих «геодинамические обстановки»

- количество землетрясений на единицу площади (плотность) энергетического класса менее 8.5;
- плотность землетрясений энергетического класса более 8.5;
- выделившаяся сейсмическая энергия
- амплитуды скоростей горизонтальных и вертикальных движений и их градиенты
- амплитуда и горизонтальный градиент полного вектора аномального магнитного поля;
- амплитуда и горизонтальный градиент внутрикоровой составляющей поля силы тяжести;
- глубина залегания и горизонтальный градиент глубины залегания поверхности Мохоровичича;
- амплитуда и горизонтальный градиент современных вертикальных движений земной коры по данным наземного геодезического нивелирования;
- градиент перепада высот поверхности по данным цифровой модели рельефа;
- амплитуда и горизонтальный градиент глубинного теплового потока.

Схема геодинамического районирования Северного Тянь-Шаня



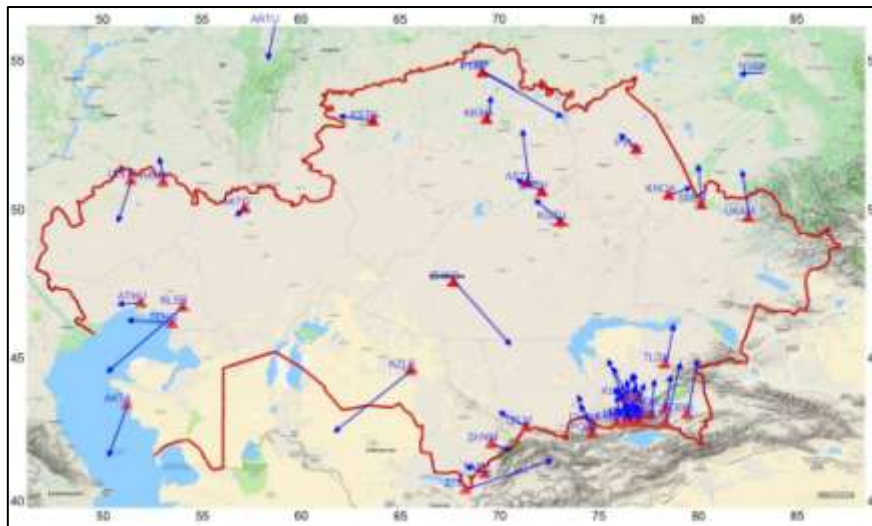
По характеру геодинамической изменчивости выделены блоки:

- ✓ устойчивого режима Балхашский (V), Саркандский (VII)
- ✓ динамичного режима Алматинский (I), Джунгарский (II)
- ✓ повышенной энергетической насыщенности Северо Тянь-Шаньский (IV), Юго-Восточный (VI)
- ✓ переходного режима Каройский (III).

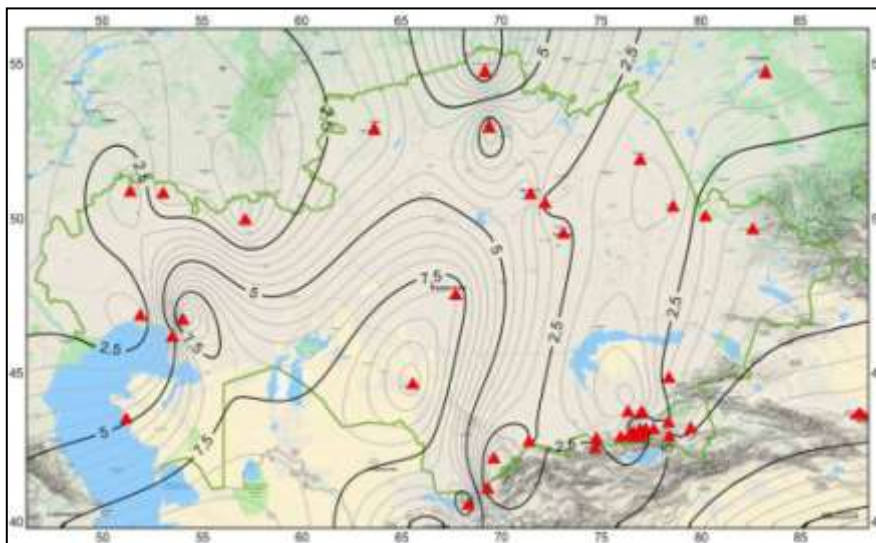
GPS станции проектной сети показаны зеленым кругом.

Третий этап развития GPS сети

Вектора горизонтальных скоростей движений GPS станций
Треугольниками обозначены GPS станции



Карта горизонтальных скоростей движений земной коры
Казахстана. Сечение изолиний 0.5 мм/год.

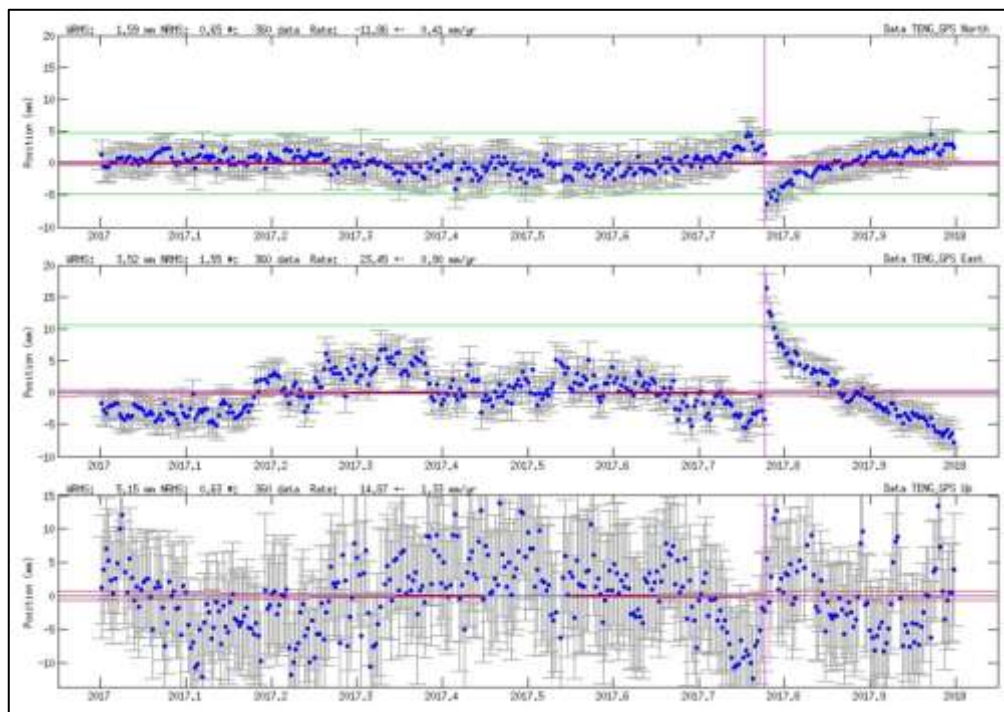


Среднеквадратические и медианные погрешности
определения скорости СДЗП различными GPS сетями

Тип погрешности	Направление	СВСН	СЕЙСМО-ПОЛИГОН	IGSS
		мм/год	мм/год	мм/год
среднее значение	SN	0.648	0.344	0.225
	WE	0.739	0.355	0.254
	Up	2.542	1.320	0.935
медианное значение	SN	0.395	0.290	0.095
	WE	0.455	0.290	0.140
	Up	1.670	1.200	0.425

- ✓ GPS сеть СВСН РК к настоящему времени не позволяет получить достоверные оценки геодинамического режима соответствующие мировому уровню. Погрешность определения скоростей составила ± 0.98 мм/год в плане и ± 2.54 мм/год по высоте.
- ✓ Сдерживающим фактором является ведомственная принадлежность GPS станций к разным организациям, не согласованное по срокам введение их в эксплуатацию, отсутствие единых требований по обслуживанию, а также низкая плотность сети (1 GPS на 50,4 тыс. кв. км) и, основное, непродолжительный период наблюдений.
- ✓ Предварительные построения скоростей СДЗП РК в виде схематических карт не могут рассматриваться как репрезентативные. Тем не менее, эта информация новая и может быть в дальнейшем дополнена и адаптирована к решению геодинамических задач.

Измерения на GPS станции TENG в 2017 г. с моментом постсейсмических смещений от триггерного землетрясения 11.10.2017 г., $M=4.1$ (вертикальная линия). Обработка GAMIT/GLOBK



Амплитуда изменения скорости по компоненте ЮС составила 20.2 мм/год, по компоненте ЗВ 43.8 мм/год. В вертикальном направлении скорость изменилась на 26.1 мм/год по модулю. Произошла смена движения станции в горизонтальном направлении на 175° .

- ✓ Учитывая магнитуду землетрясения и расстояние до эпицентра, зарегистрированные смещения не могут быть объяснены в рамках классической деформационной модели.
- ✓ В результате нефтедобычи техногенные нагрузки взаимодействуют с естественными факторами изменения НДС земной коры. Изменениям подвергается флюидонасыщенность верхних горизонтов и величины пластовых давлений, что определяет поле НДС.
- ✓ Изменение деформационного режима, находящегося в критическом состоянии, от триггерного воздействия удаленного

Основные результаты мониторинга на основе GPS-наблюдений на территории Казахстана:

- ✓ создание сетей непрерывных региональных и локальных наблюдений
- ✓ организация системы обработки исходных данных в соответствии с мировой практикой
- ✓ вычисление полей разнообразных деформационных параметров НДС земной коры
- ✓ установление корреляции СДЗК и деформаций с сейсмическими характеристиками

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

THANK YOU FOR ATTENTION