

УДК 551.24.312

МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

Вилыев А.В., Жантаев Ж.Ш.

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

Введение

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

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 [6,9,11,12]. 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. Для проверки геодинамической стабильности Казахской платформы, в 1998 г. в Центральном Казахстане была заложена сеть из 23 пунктов. Затем в 2000 г. были добавлены еще 31 пунктов на территории восточного Казахстана. Цель создания Центрально-Казахстанской GPS сети заключалась в подтверждении отсутствия движений и деформаций коры в пределах Казахского щита, который считался стабильным опорным блоком. Задачей Восточно-Казахстанской сети было увязать деформационные процессы в Тянь-Шане с Алтае-Саянским регионом. К 2006 г. общее количество пунктов GPS в Центральной Азии превысило 400. Измерения на каждом пункте проводились с 30-секундными интервалами ежегодно или раз в два года, за исключением станций непрерывной регистрации. В последнее время эпизодические наблюдения на этой сети прекращены.

Второй этап развития Казахстанского сегмента 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. В соответствии с мировой практикой обработка данных осуществляется программным комплексом GAMIT/GLOBK [7,8]. Среднесуточные решения объединяются в системе координат ITRF2008 с результатами измерений более 20 станций мировой IGSS сети. В результате вычисляются значения смещений по долготе, широте и высоте. Точность определения координат за период 2009-2017 гг. составила в плане 0.3 мм, по высоте - 3.6 мм.

На третьем этапе развития GPS технологий с 2016 г. силами АО «НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», АО «Leica Geosystem Kazakhstan», ДТОО «Геотроникс» введена в эксплуатацию сеть высокоточной спутниковой навигации (СВСН РК) из 112 GPS станций. Сеть предназначена для решения геодезических задач в строительстве и в других областях народного хозяйства (рис.1). GPS станции СВСН покрывают 80% площади Казахстана и 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.

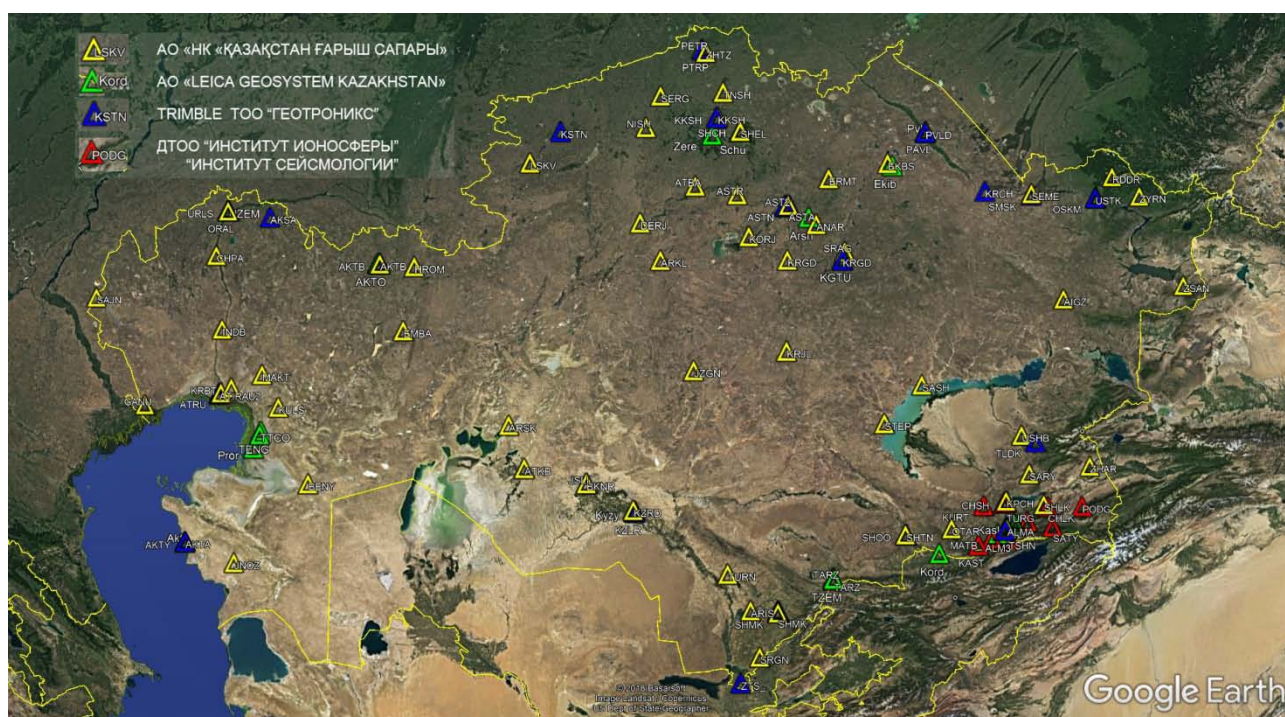


Рис. 1. Схема GPS сети Казахстана.

Основные результаты

GPS измерения на первом этапе создания сети дали новые материалы для понимания современной геодинамики и сейсмотектоники территории Казахстана. Впервые были определены скорости СДЗК (рис.2). Векторы скоростей имеют преимущественно меридиональное направление, а их величины убывают с юга на север. Это свидетельствует о сокращении земной поверхности Центрального Тянь-Шаня со скоростями 11-13 мм/год в процессе столкновения Индийской и Евразийской плит, что согласуется с геологическими данными о субмеридиональном сжатии. По сети казахстанских GPS-пунктов установлен характер движений земной коры юго-восточного региона Казахстана.

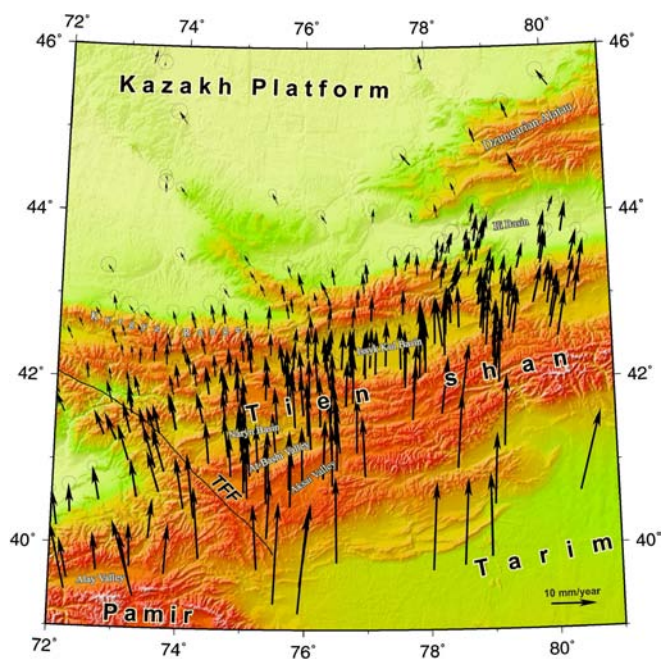


Рис. 2. Карта векторов скоростей, вычисленных относительно Евразии [11].

Было показано, что Казахский щит относительно всей Евразии остается неподвижным и не испытывает значимых внутренних деформаций. В пределах Джунгарского Алатау скорости СДЗК уменьшаются до значений 1-3 мм/год для блоков земной коры, взаимодействующих с Казахской платформой на западе. 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 наблюдаются незначительные (по сравнению с Тянь-Шанем) скорости СДЗК, возрастающие к северу в российской части Алтая.

Распределение скоростей движений земной поверхности по измерениям на Алматинском сейсмополигоне послужило основой для разработки модели напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры Северного Тянь-Шаня [1,10]. Компоненты скорости смещений были интерпретированы как составляющие тензора деформаций. Земная кора аппроксимирована моделью

сплошной однородной среды, соответствующей закону Гука. Ориентация осей главных деформаций коррелирует с глубинными тектоническими разломами в азимутальном аспекте. Направление растяжений преимущественно субширотное в пределах центральной части Северного Тянь-Шаня. Ориентация сжимающих деформаций меняется от северо-восточной на западе к меридиональной в центральной части и к северо-западной на восточном фланге. Резкая смена направления главных осей по широте 43° с.ш. восточнее меридиана 76° в.д. 79° в.д. соответствует простиранию основных тектонических нарушений (рис.3).

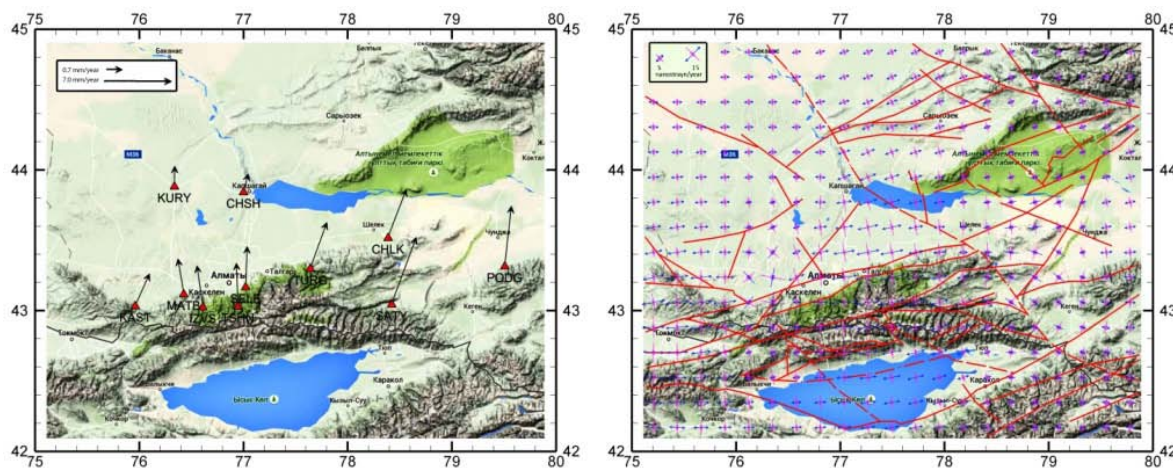


Рис. 3. Схема GPS сети Алматинского полигона и вектора скоростей СДЗК (слева) и ориентация осей главных напряжений с основными разломами (справа).

Горизонтальные деформации максимального сжатия обуславливают укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север до 30×10^{-9} . В центральной части проявляются девиаторные растяжения, ориентированные 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} .

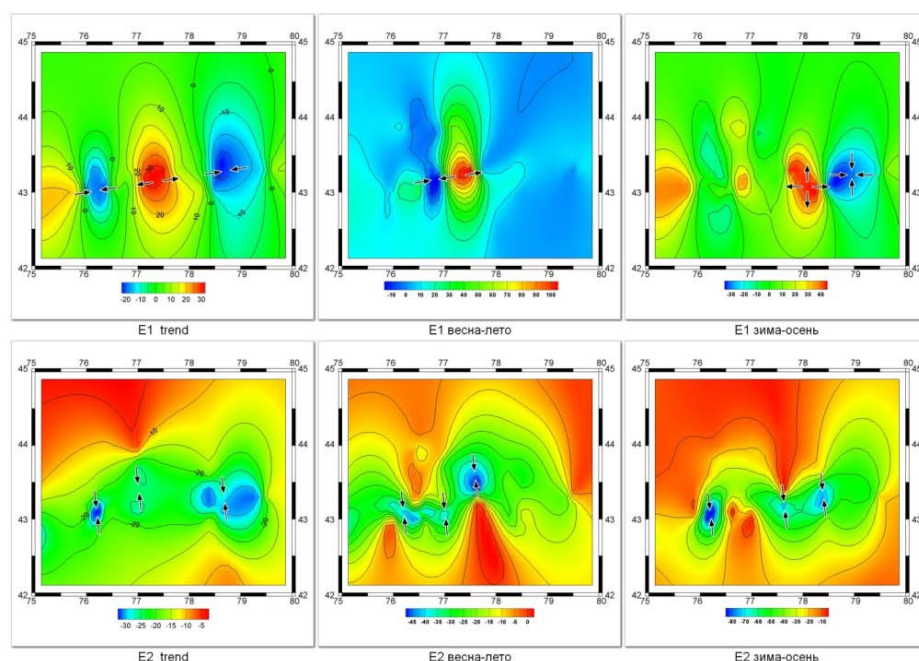


Рис. 4. Динамика сезонных вариаций главных деформаций земной поверхности Северного Тянь-Шаня. Деформации одноосного сжатия E1 (слева направо): 1 – региональный тренд, 2 – весна-лето, 3 – зима-осень; деформации одноосного растяжения E2: 4 – региональный тренд, 5 – весна-лето, 6 – зима-осень (стрелки – направления сжатия-растяжения)

Динамика сезонных изменений СДЗК Северного Тянь-Шаня обусловлена атмосферной циркуляцией и орографическими особенностями подстилающей поверхности. В холодное время года преобладают юго-западные направления горизонтальных смещений, в теплое – северо-восточные. Орографическое влияние горных массивов на поле скоростей проявляется в сохранении амплитуд и азимутальных направлений в южной области, перекрытой от влияния барических масс горными хребтами Северного Тянь-Шаня. В осенне-зимний период происходит смена направления смещений в северо-западной и центральной областях, подверженных воздействию холодных фронтов Сибирского антициклона. Годичный перепад

скоростей достигает 8 мм/год и отражает изменение амплитуд деформаций одноосного расширения отдельных областей в два и более раза [2-4]. При этом региональная субширотная ориентация оси сжатия сохраняется (рис. 4).

Установлена приуроченность скопления слабых землетрясений к границам взаимодействия блоков земной коры по характеру направления вращения в поле циркуляций ротора горизонтальных скоростей (рис. 5). Разнонаправленное вращательное движение блоков приводит к образованию в пограничной зоне внутренних дислокаций, проявляющихся в форме мелких землетрясений. В поле максимальной деформации сдвига эпицентры сильнейших землетрясений (Верненское 1887 г., $M=7.3$; Чиликское 1889 г., $M=8.3$; Кеминское 1911 г., $M=8.2$) контролируются граничной областью минимальных значений сдвиговых деформаций и приурочены к их максимальным градиентам. По значениям критерия прочности земной коры (Мора-Кулона), определяющим условия разрушения при сдвиговых напряжениях, на западном и восточном флангах хребта Заилийский Алатау выделены области подготовки возможных сильных землетрясений.

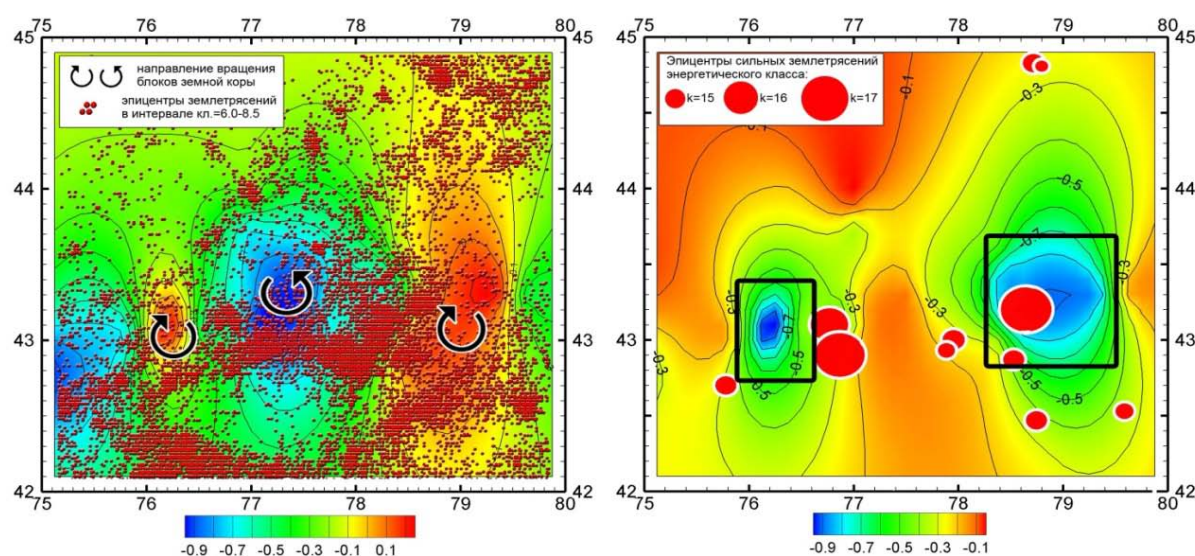


Рис. 5. Схема нормированного ротора горизонтальных скоростей с эпицентрами землетрясений (слева, $K=6.0\div 8.5$) и нормированного критерия прочности (Мора-Кулона) с эпицентрами землетрясений (справа, $K\geq 16.0$) и областями критических значений.

Для повышения репрезентативности геодинамических построений и дальнейшего развития GPS сети, методом кластерного анализа выполнено районирование сейсмоактивного региона юго-восточного Казахстана [5]. Выделены четыре группы блоков, статистически характеризующих геодинамический режим литосферы (рис. 6).

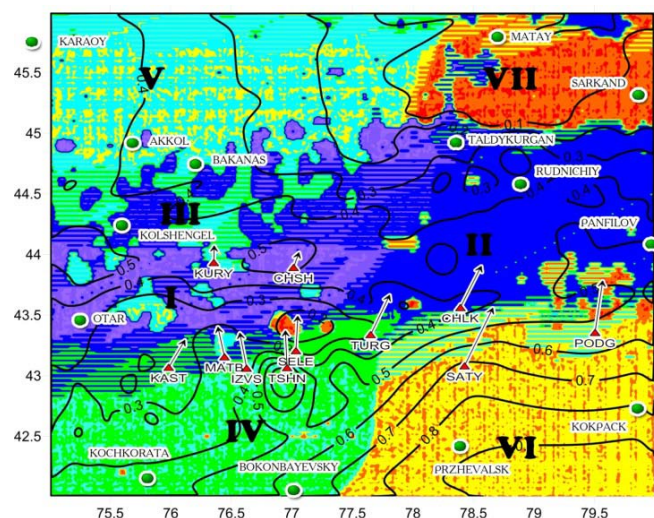


Рис. 6. Схема геодинамического районирования территории Северного Тянь-Шаня с эпицентрами землетрясений и векторами скоростей движения GPS станций. По характеру геодинамической изменчивости выделены блоки: - устойчивого режима Балхашский (V), Саркандский (VII); - динамичного режима Алматинский (I), Джунгарский (II); - повышенной энергетической насыщенности – Северо Тянь-Шаньский (IV), Юго-Восточный (VI); - переходного режима – Каройский (III). GPS станции проектной сети показаны зелеными кругами.

Использовались следующие параметрические данные: плотность землетрясений, выделившаяся сейсмическая энергия на единицу площади, амплитуды скоростей СДЗК и их градиенты, амплитуда и горизонтальный градиент коровой составляющей поля силы тяжести, глубина залегания и горизонтальный градиент изменения глубины поверхности

Мохоровичича, градиент высот поверхности по данным цифровой модели рельефа, амплитуда и горизонтальный градиент глубинного теплового потока. Разработанная геодинамическая схема территории учитывается при выборе мест заложения новых пунктов GPS наблюдений.

Развернутая с 2016 г. программа развития GPS сети высокоточной спутниковой навигации (СВСН РК) к настоящему времени не позволяет получить оценки геодинамического режима всей территории Казахстана. Сдерживающим фактором является ведомственная принадлежность GPS станций к разным организациям, не согласованное по срокам введение их в эксплуатацию и отсутствие единых требований по их обслуживанию, а также низкая плотность сети и непродолжительный период наблюдений. Поэтому предварительные построения скоростей СДЗК (рис. 7) не могут рассматриваться как репрезентативные. Тем не менее, эта информация может быть в дальнейшем дополнена и адаптирована к решению геодинамических задач.

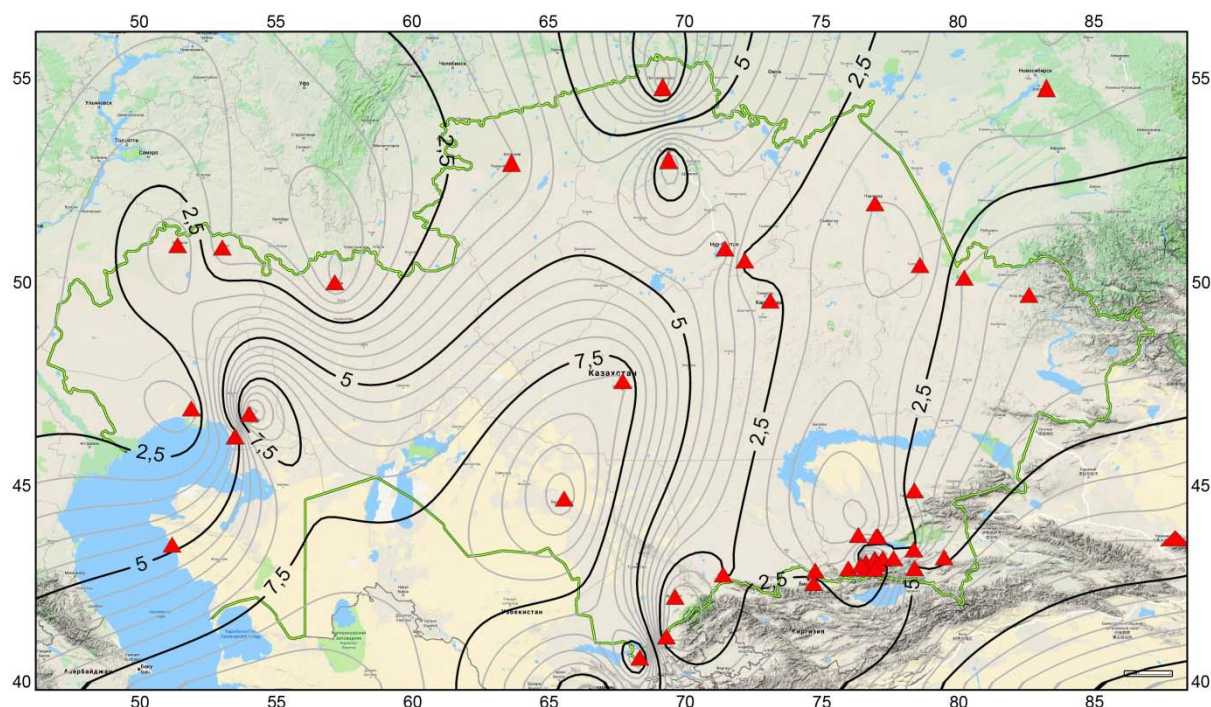


Рис. 7. Карта горизонтальных скоростей современных движений земной коры Казахстана. Сечение изолиний 0.5 мм/год. Треугольниками обозначены GPS станции непрерывного мониторинга.

В качестве примера на рис. 8 приведена регистрация постсейсмических смещений на GPS станции TENG от землетрясения 11.10.2017 г., $M=4.1$. Станция TENG расположена на крупнейшем Тенгизском нефтегазовом месторождении с годовой добычей более 30 млн. т нефти. Землетрясение произошло в акватории Каспийского моря на эпицентральной расстоянии 580 км. Модуль амплитуды изменения скорости по компоненте ЮС составил 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° .

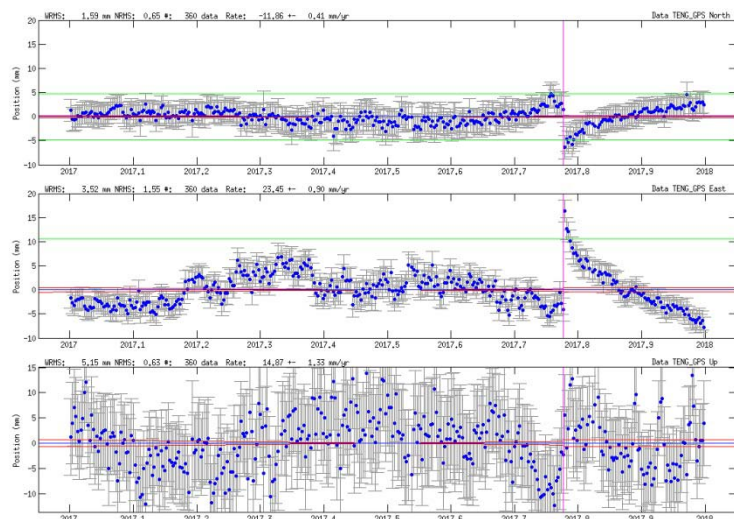


Рис. 8. Измерения на GPS станции TENG в 2017 г. с моментом постсейсмических смещений от землетрясения 11.10.2017 г., $M=4.1$ (вертикальная линия). Обработка GAMIT/GLOBK.

Учитывая магнитуду землетрясения и расстояние до эпицентра, зарегистрированные смещения не могут быть объяснены в рамках классической деформационной модели.

Предполагается, что критическое напряженное состояние блоков земной коры на месторождении

изменилось в результате триггерного воздействия этого землетрясения. В результате нефтедобычи техногенные нагрузки на породы земной коры взаимодействуют с естественными факторами изменения НДС. В процессе эксплуатации месторождения изменениям подвергается флюидонасыщенность верхних горизонтов и величины пластовых давлений, что также может влиять на изменения напряженно-деформированного состояния горных пород. Изменение деформационного режима, находящегося в критическом состоянии, по-видимому, было зафиксировано в смещениях GPS станции.

Заключение

В Республике Казахстан современные геодинамические процессы исследуются средствами высокоточных GPS-измерений на основе мониторинга поля скоростей СДЗК. Такие исследования выполняются как для районов со сравнительно спокойной геодинамической обстановкой, так и для районов повышенной сейсмической активности. Для обеспечения эффективности мониторинга привлекаются математические методы моделирования деформационного режима земной коры, дополняющие возможности технологии GPS.

Основными результатами развития мониторинга на основе GPS-наблюдений на территории Казахстана являются создание сетей непрерывных региональных и локальных наблюдений; организация системы обработки исходных данных в соответствии с мировой практикой; вычисление полей разнообразных деформационных параметров; установление корреляции СДЗК и деформаций с сейсмическими характеристиками юго-восточного Казахстана.

Список литературы

1. Вилев А.В., Жантаев Ж.Ш. Современные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня по данным спутниковой геодезии // Сборник докладов Международной научной конференции "Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии", Узбекистан, г. Ташкент, 15-16 октября 2018 г. С. 200–205.
2. Вилев А.В., Жантаев Ж.Ш., Стихарный А.П. Динамика сезонных движений GPS станций на территории Северного Тянь-Шаня // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. Алматы, 2016. № 4 (№308). С. 34–39.
3. Жантаев Ж.Ш., Вилев А.В. Оценка сезонных деформаций земной коры по данным GPS мониторинга // В64 Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений. Тез. докл. Междунар. Юбилейной науч. конф., г. Бишкек, 3–7 июля 2018 г. Бишкек: НС РАН, 2018. С. 39–40.
4. Жантаев Ж.Ш., Вилев А.В. Диагностика вариаций поля напряженно-деформированного состояния приповерхностных участков земной коры по данным GPS наблюдений // Триггерные эффекты в геосистемах. Москва, 6–9 июня 2017 г.: материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2017. С. 98–105.
5. Жантаев Ж.Ш., Вилев А.В., Стихарный А.П. Применение геодинамического районирования при оценке сейсмической опасности // Современные проблемы механики. 2018. №33(3). С. 349–356.
6. Herring, T.A., Hager B.H., Meade B., Zubovich A. V. Contemporary horizontal and vertical deformation in the Tien Shan // Proc. of the Intern. seminar «On the Use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies». Moscow: GEOS, 2002.
7. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMITGPS Analysis at MIT // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
8. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.4. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010B. 90 p.
9. Reigber Ch., Michel G. W., Galas R. et al. New space geodetic constraints on the distribution of deformation in Central Asia // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 191. P. 157–165.
10. Vilayev A.V., ZhantayevZh.Sh., Bibosinov A.Zh. Monitoring crustal movements in northern Tianshan Mountain based on GPS technology // Geodesy and Geodynamics. 2017. V.8. Issue 3. P. 155–159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.006>
11. Zubovich, A. V., et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. 2010. 29. TC6014, doi:10.1029/2010TC002772.
12. Zubovich A. V., Schelochkov G.G., Mosienko O.I. et al. Geodynamic GPS network of the Central Asia // Proc. of the International seminar «On the Use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies». Moscow: GEOS, 2002.