

УДК 550.34.038(574)

Е. Н. НУСИПОВ¹, Ю. Г. ЩЕРБА²

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

Қазақстан Республикасы аймағының литосфералық жағдайына геодинамикалық бақылау жүргізу қажеттілігі өртүрлі сипаттамалық анықтамалар жиынтығымен анықталады, олардың қатарына: геодинамикалық жағдайлардың өртүрлілігі едәуір сейсмикалық белсенділігі жоғары аймақта Республикамыздың шығысында, оңтүстік-шығыста және шығыста, барлау жүргізілетін шектеулі аймақта қарқынды техногендік әсерлер немесе көмірсутек өнімдері және басқа да пайдалы қазбалар, аймақтың белгілі бір бөлігінде тегіс емес және жеткіліксіз меңгерілген жерлердің геодинамикалық жағдайлары, жер қыртысының табиғи және техногендік үзіліссіз байланыс әсерлері жатады. Осы бақылауларды жүргізетін ұйым қазіргі жағдайда жаңа космостық технологияларды пайдалану арқылы, жер беті қозғалысының ерекшеліктерін интерпретацияға және егжей-тегжейлі зерттеулерге сүйену арқылы жан-жақты зерттеу жүргізуде.

Необходимость мониторинга геодинамического состояния литосферы на территории Республики Казахстан определяется совокупностью обстоятельств – разнообразие геодинамических условий при наличии значительных территорий с повышенной сейсмической активностью на востоке, юго-востоке и юге республики, интенсивная техногенная деятельность в регионах разведки и добычи углеводородов и других полезных ископаемых, неравномерная и недостаточная изученность геодинамических условий на значительной части территории, наличие несомненной связи факторов воздействия на земную кору естественного и техногенного происхождения. Организация такого мониторинга во многом подготовлена уже проведенными исследованиями с применением новейших наземно-космических технологий, опирающихся на детальное изучение и интерпретацию особенностей современных движений земной поверхности.

Necessity of monitoring of a geodynamic status lithosphere in territory of Republic of Kazakhstan are determined by set of circumstances of various character, among which: a variety of geodynamic conditions at presence of significant territories with the raised seismic activity in east, southeast and south of Republic, intensive production process by activity within the limits of regions of investigation both production of hydrocarbon and other minerals, non-uniform and insufficient studied of geodynamic conditions within the limits of a significant part of territory, presence of doubtless communication of the factors of influence on terrestrial crust natural and production process of an origin. The organization of such monitoring now in many respects is prepared already by carried out researches with application of the newest earth-space technologies basing on detailed study and interpretation of features of modern movements of a terrestrial surface.

Ақтуальность постоянного мониторинга геодинамического состояния литосферы на территории Республики Казахстан давно обоснована работами многих специалистов, а также теми результатами, которые были получены ранее средствами наземной геодезии и другими методами исследований [1–6].

В предлагаемой статье кратко рассмотрено состояние вопроса по становлению новейших методов мониторинга геодинамического состояния литосферы в Казахстане. В последующих статьях предусматривается подробнее остановиться на вопросах методики работ с использованием GPS и принципиально новых результатах фун-

даментального и прикладного характера, полученных в результате интерпретации данных о современных движениях на территории республики и прилегающих регионах, в первую очередь, в сейсмически активных структурах Северного Тянь-Шаня.

Прежде всего, мониторинг необходим для обеспечения геодинамической безопасности республики, во многом связанной, в последнее время и в ближайшем будущем, с воздействием на литосферу как естественных, так и техногенных факторов. Научно обоснованной модели таких процессов не известно, но имеются многочисленные систематизированные факты катастрофичес-

^{1,2}Қазақстан, 050060, Алматы, протпект аль-Фараби, 75 а, Институт сейсмологии.

ких последствий по различным странам и регионам мира [2]. Нет особой необходимости рассматривать возможные варианты таких событий. Главное то, что они неизбежны, а нейтрализация последствий существенно зависит от возможности не допускать нежелательного хода геодинамических процессов или уметь надежно их прогнозировать. Эти две проблемы тесно связаны и состоят в умении объективно оценить текущее геодинамическое состояние геологической среды, в первую очередь, земной коры как части литосферы.

Здесь уместным будет сослаться на известные факты, когда в 1994–1996 гг., а также в 2001 г. в Центральном Казахстане в районе Жезказгана и Шалгинска произошла серия землетрясений с автэршоками и магнитудой 3–4,6 [5]. Этот регион не характеризовался как сейсмически активный. Анализ особенностей современных вертикальных движений позволил убедительно прояснить причину этих событий. Проведенные в прошлом веке и начале нынешнего значительные объемы работ по изучению современных движений земной поверхности и сопоставление некоторых результатов со структурными особенностями основания коры, распределением сейсмичности убедительно показали, что именно современные движения (так же, как и полноценные данные о ходе сейсмического процесса) являются надежными носителями информации о текущем геодинамическом состоянии литосферы. Это обстоятельство существенно повышает роль этих методов в мониторинге и формировании прогноза в числе обширного комплекса других методов исследований.

Еще с 30-х годов прошлого века на территории Северо-Тянь-Шаньского региона и в пределах Казахстана получены уникальные данные о вертикальных движениях земной поверхности методом нивелирования по сети профилей, выполнявшихся предприятиями Главного управления геодезии и картографии при Кабинете Министров Республики Казахстан в содружестве с рядом организаций.

С 1992 г. и по настоящее время систематически ведутся работы по высокоточным спутниковым измерениям координат точек земной поверхности с использованием технологии GPS (США), которая была создана специалистами НАСА на базе спутников серии NAVSTAR. Ис-

тория становления высокоточных спутниковых измерений координат точек поверхности земли в Центрально-Азиатском регионе достаточно подробно изложена в монографии [7]. Основоположниками этих глобальных исследований явились специалисты из России, Кыргызстана, Узбекистана, Республики Казахстан, при активном содействии на начальном этапе специалистов и ученых Массачусетского технологического института и Индианского университета (США).

На этапе становления работ цель исследований сформулирована как использование Глобальной системы позиционирования (GPS) для исследования относительных движений плит, межплитовых деформаций и сейсмически активных разломов в регионе. Обширный круг задач включал, наряду с основными, много других, в числе которых значительную роль составляли организационно-технические, методические. Значительный объем состоял в развитии сетей измерения и их технического обеспечения (конструкция реперов, их закладка). Создание баз данных и важнейшая задача – организация и осуществление первичной обработки данных. На первом этапе исследований 1992–1995 гг. эти задачи были успешно решены во многом сотрудниками НС ОИ ИВТ РАН (в г. Бишкеке). В проведение полевых измерений существенный вклад, наряду со специалистами НС ОИ ИВТ РАН, внесли сотрудники СОМЭ и Института сейсмологии МОН РК. Особую роль в организации и методической направленности исследований играли специалисты Научной станции Института высоких температур РАН в г. Бишкеке, на базе которой ныне организован Международный научно-исследовательский центр – геодинамический полигон в г. Бишкеке (МНИЦ-ГП). В содружестве специалистов этих организаций к настоящему времени развития и отработана региональная сеть измерений, состоящая из более чем 450 пунктов на территориях центральноазиатских государств (Восточный Узбекистан, Кыргызстан, Казахстан). На начальном этапе значительную роль в становлении работ играли специалисты и ученые Массачусетского технологического института (США). Эта сеть наиболее представительна на территории Республики Кыргызстан, на юго-востоке Казахстана. В Центральном и Восточном Казахстане региональная сеть редкая и совместно

включает порядка 60 пунктов. Кроме региональной сети у городов Бишкек и Алматы, действуют сети локальных GPS-измерений и до десяти перманентных станций. Накопленный опыт работ по методике их осуществления, а также уже полученные результаты позволяют вполне обоснованно подойти к организации таких исследований на всей территории республики. Основанием являются не только проблемы контроля за геодинамическим состоянием литосферы Казахстана, но и полученные фундаментальные научные результаты, состоящие в установлении надежной связи между особенностями современных движений и морфологией основания земной коры, непосредственно прилегающей к верхней мантии, в выявлении современных тектонически активных структур на Северном Тянь-Шане, возможности их разделения по степени активизации в условных параметрах, в установлении однозначной приуроченности эпицентров сильнейших землетрясений к областям современной активизации. Важным здесь является тот факт, что выявляемые геодинамические особенности являются именно таковыми в современное время в пределах нескольких лет. Это существенно в сравнении с традиционными, в частности геолого-геофизическими, методами, имеющими временную разрешенность в сотни тысяч лет. Названные результаты были получены в связи с разработкой в Институте сейсмологии специальной технологии расчета полей скоростей деформаций и построения ряда основополагающих карт по результатам таких расчетов. Такой подход позволил увязать данные предшествующих исследований по тектонике, моделям земной коры на основе физических свойств пород и скоростным разрезам, с данными статистической обработки многолетнего хода сейсмичности региона. Таким образом, фактически полученные фундаментальные результаты свидетельствуют о принципиальной научной обоснованности мониторинга геодинамического состояния литосферы на территории республики.

Существенным отличием орбитальных методов изучения движений земной поверхности от наземных являются возможность одновременного охвата значительных территорий, высокая надежность результатов, сравнительно небольшая стоимость работ, малая зависимость от кли-

матических условий. Немаловажным обстоятельством является и то, что эти технологии опираются на данные развитой сети международных станций. В настоящее время наиболее распространены две принципиально различные технологии, осуществляемые с применением космических средств. Это технология высокоточного измерения координат точек земной поверхности на основе системы GPS и технология радиointерференционных измерений вариаций рельефа поверхности спутниковыми средствами. Обе они развиты до состояния практического применения для любого участка поверхности Земли. Популярность системы GPS в настоящее время настолько высока, что многими странами рассматривается вопрос о создании независимых систем аналогичного назначения. В России это система «Глонасс», созданная практически одновременно с GPS, но существенно деградировавшая в процессе перестройки и возрождаемая вновь. Европейский союз практически готов осуществить систему «Галилео», в КНР прорабатывается вопрос о создании системы позиционирования на основе геостационарных спутников (Бэйдоу). Действующая система GPS продолжает интенсивно совершенствоваться. Специалистами НАСА предлагаются принципиально новые пути ее усовершенствования и развития. В частности, наряду с модернизацией самой системы при сохранении принципа преемственности в более отдаленной перспективе рассматривается проект об использовании в качестве абсолютной системы отсчета координат на основе удаленных объектов галактики – некоторых квазизвездных источников излучения, расположенных на удалении миллионы световых лет и поэтому практически неподвижных на небесной сфере.

В отличие от доплеровского варианта определения скорости движения объекта (транспортного средства), широко известного при навигационном применении GPS, для геодинамических задач определение скорости современных (тектонических) движений основано на сравнении координат одного и того же пункта, определенных в разное время. Это и составляет основу технологии использования GPS при решении задач геодинамики. Каких-либо условий для начала наблюдений, их окончания в принципе не существует. Некоторые специальные требования

сравнительно легко осуществимы и не приводят к дополнительным существенным затратам. Современная разработанная и апробированная технология измерения геодинамического назначения опубликована в разных источниках. Применительно к условиям Казахстана и Тянь-Шаньского региона можно указать источник [3]. Обеспечение необходимой точности определения скорости движения пунктов измерения на поверхности земли достигается большим числом независимых определений координат в течение времени, за которое тектонические причины изменили положение пунктов, пренебрежимо мало. Обычно это время может составлять несколько десятков часов или суток. Кроме того, используется и тот факт, что постоянно происходящие тектонические движения (за исключением экстремальных сейсмических) характеризуются выдержанностью скоростей различных точек поверхности в пределах нескольких лет (возможно, десятков и более лет).

Радиоинтерферометрические измерения вариаций рельефа поверхности основаны на определении разности фаз высокостабильного радиосигнала, рассеянного одной и той же поверхностью в разное время. Технология осуществляется с использованием низкоорбитальных спутников, поэтому между независимыми съемками должно пройти некоторое время, через которое спутник вновь окажется над изучаемой территорией в допустимом интервале отклонений. Эта технология, в отличие от технологии GPS, более подходит к мониторингу сравнительно ограниченных по размерам, вытянутых, преимущественно вдоль проекции траектории спутника на поверхность земли, площадей и расположенных в пределах регионов с повышенной активностью. Радиоинтерферометрия весьма удобна для оценки произошедших дислокаций поверхности в результате тех или иных событий. Для этого необходимо, чтобы первая информация была получена до события. По разным причинам эти перспектив-

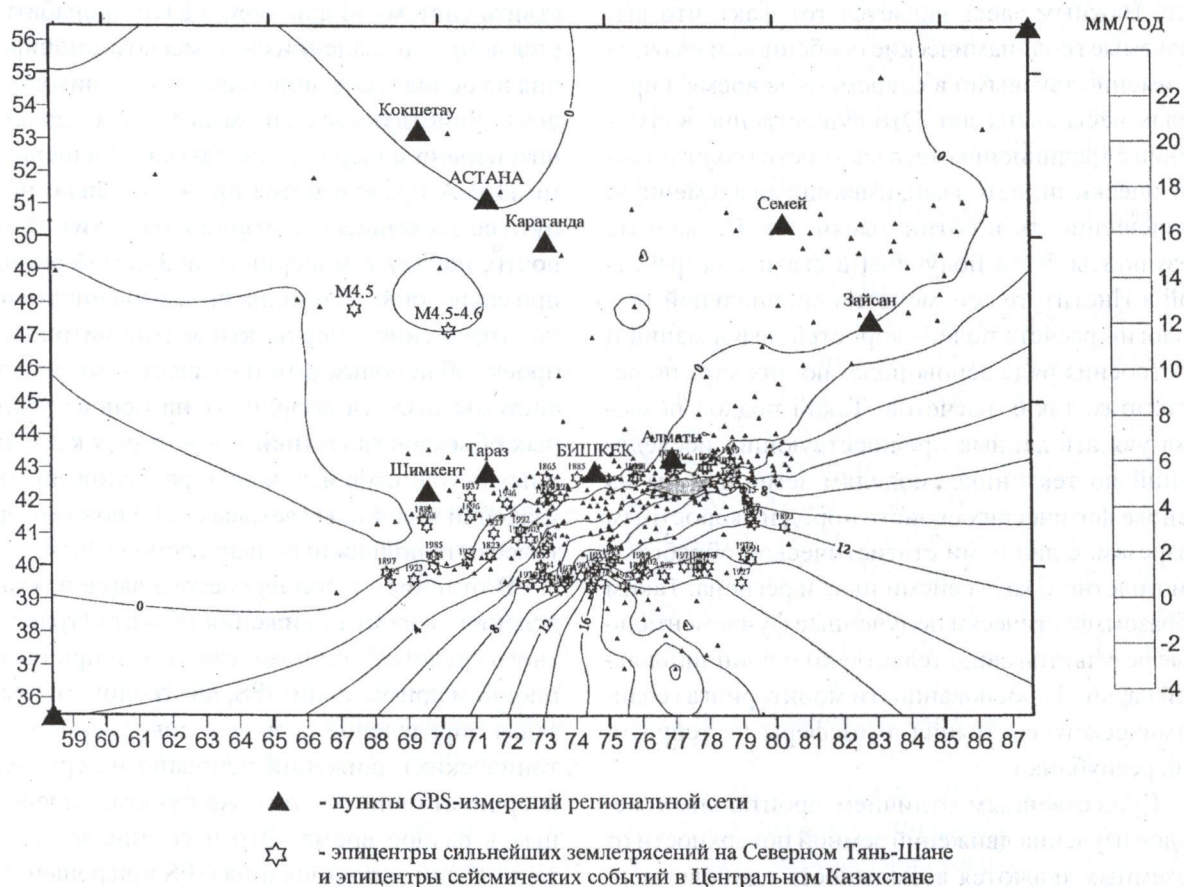


Рис. 1. Остаточное поле компоненты скорости современных движений юг–север по данным GPS-измерений 1995–2004 гг. и система пунктов региональной сети GPS Казахстана и прилегающих регионов. Эпицентры сильнейших землетрясений на Северном Тянь-Шане

ные и необходимые исследования на территории республики до сих пор не проводятся. Необходимость их давно назрела. Радиointерферометрия весьма перспективна и для мониторинга водной поверхности, особенно при опасности ее загрязнения нефтепродуктами. Возможно выявление пятен углеводородов в виде пленок почти молекулярной толщины, так как загрязненная поверхность сильно отличается от чистой водной поверхности по коэффициенту отражения зондирующего радиосигнала. Достоинства метода состоят также и в том, что не исключено получение ценной информации при различной структуре и рассеивающих свойствах исследуемой поверхности. При зондированиях могут использоваться сигналы с различной ориентацией плоскости поляризации, что также обеспечивает дополнительные методические возможности.

Современная сеть пунктов региональных высокоточных GPS-измерений координат точек земной поверхности представлена на рис. 1–3 совме-

стно с картами взаимно ортогональных компонент остаточной скорости современных движений.

Фактически эти карты являются исходными данными для последующей интерпретации и оценки текущей геодинамической обстановки. Здесь же показаны эпицентры сильнейших сейсмических событий на Северном Тянь-Шане. Приведенные карты компонент представляют, так называемое, остаточное поле, получаемое в результате вычитания из поля абсолютной скорости (в координатах геоцентрической системы координат) вектора, характеризующего условно региональную составляющую поля. За региональную составляющую принято некоторое усредненное значение скорости для относительно спокойной в геодинамическом отношении части территории, например Казахского щита. Исходные данные в виде значений трех взаимно ортогональных компонент скорости (вертикальной и двух горизонтальных – по меридиану и широте) получены при предварительной, достаточно тру-

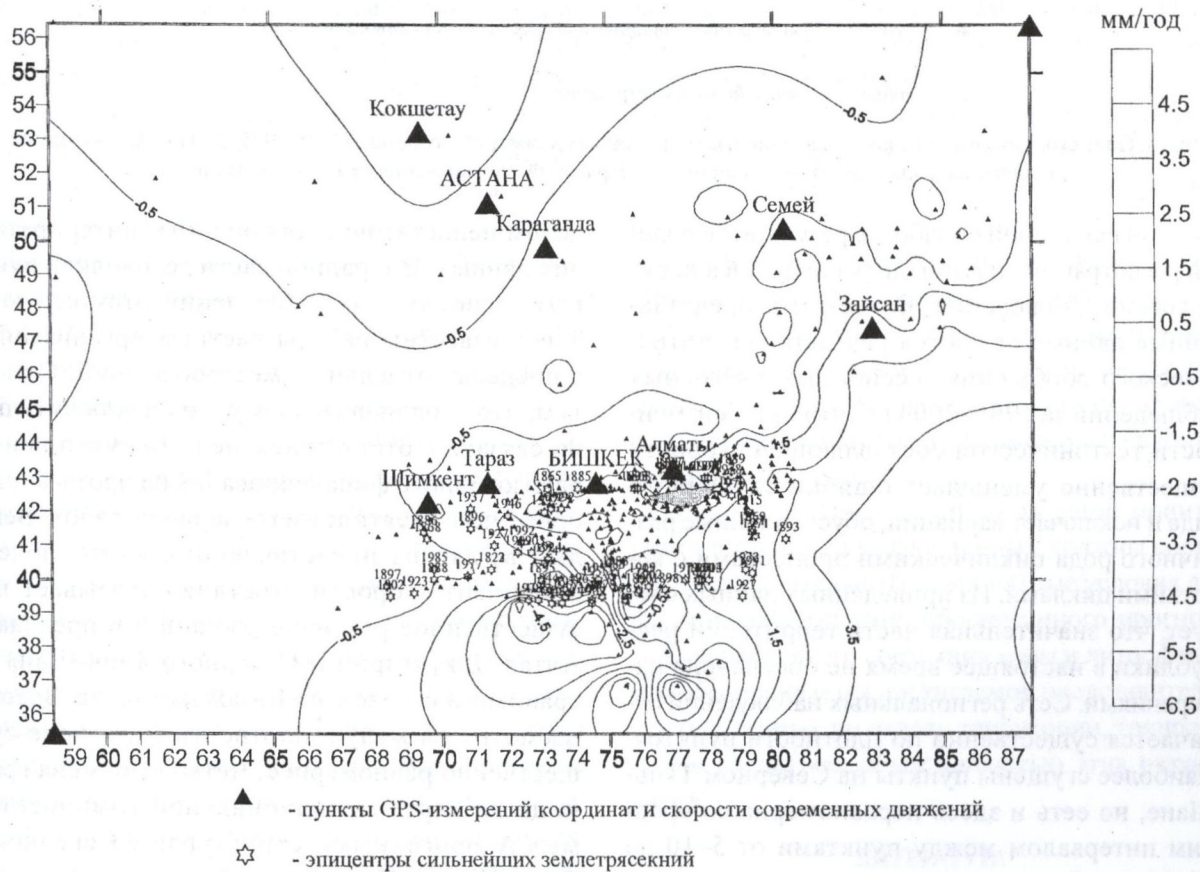


Рис. 2. Остаточное поле компоненты скорости современных движений запад–восток по данным GPS-измерений за период 1995–2004 гг. Сеть пунктов региональной сети GPS и эпицентры сильнейших землетрясений

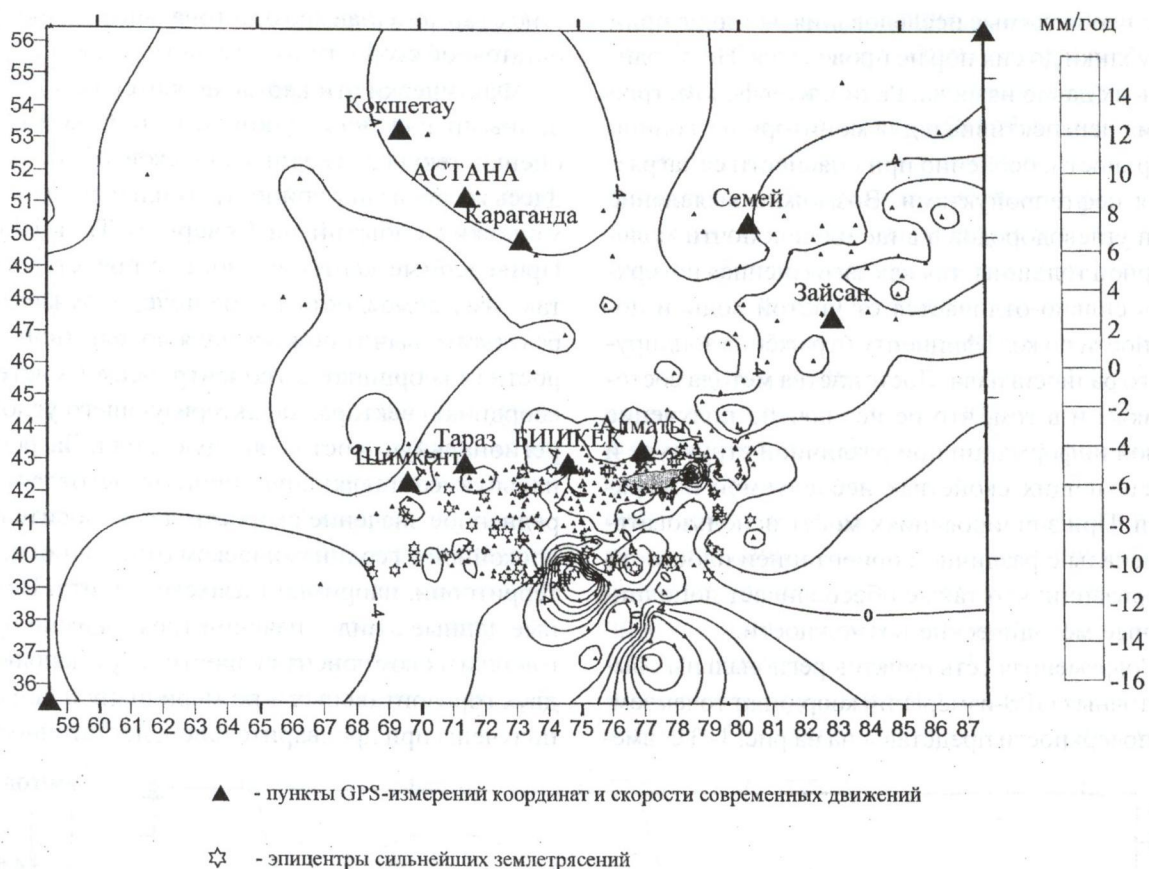


Рис. 3. Поле скорости вертикальной компоненты современных движений по данным GPS 1995–2004 гг. Сеть пунктов измерения и эпицентры сильнейших землетрясений. (обозначения те же, что и на рис. 1)

доемкой первичной обработке результатов полевой регистрации спутниковых сигналов в период сессий наблюдения. Более того, представленные данные являются результатом статистического обобщения сессионных ежегодных наблюдений за 1995–2004 гг., что при неизменности тектонической составляющей скорости существенно уменьшает ошибки случайного вида и исключает вариации, обусловленные различного рода циклическими процессами с короткими циклами. Из приведенных данных следует, что значительная часть территории республики в настоящее время не обеспечена измерениями. Сеть региональных наблюдений отличается существенно по плотности пунктов. Наиболее сгущены пункты на Северном Тянь-Шане, но сеть и здесь неравномерна со средним интервалом между пунктами от 5–10 до 25–30 км. В основном неравномерность сети здесь вызвана труднодоступностью местности. В Центральном Казахстане пункты GPS сети располагаются не ближе 200 км, что в

целом недостаточно для полноты интерпретации данных. В западной части республики пункты региональных наблюдений отсутствуют. Здесь известны работы частных организаций в пределах отдельных месторождений. Отметим, что сложившаяся ситуация исключительно связана с отсутствием необходимого централизованного финансирования на протяжении более чем десятилетнего периода работ. Беглый взгляд на представленные карты полей компонент скорости отчетливо указывает на существенное различие изолиний в пределах Алтая, Джунгарии и Северного Тянь-Шаня в сравнении с полем на Казахском щите. Здесь, несмотря на малую плотность сети, поле существенно равномернее. Четко выражена граница на карте меридиональной компоненты между орогенными структурами Северного Тянь-Шаня и Казахским щитом, что указывалось схематически в работе [8] до окончания наших разработок по анализу полей современных движений. Неравномерность поля скорос-

тей указывает на распространенность в этих местах деформационных процессов и соответственно современных геодинамических проявлений. Об этом же свидетельствует и характерная приуроченность эпицентров сильнейших землетрясений к особенностям поля скорости. На карте широтной компоненты (рис. 2) отчетливо прослеживается область, на которой происходит смена знака компоненты. За положительные направления приняты запад-восток и юг-север. Карта вертикальной компоненты скорости по специфическим условиям регистрации (геометрии волновых фронтов спутниковых сигналов и их взаимного расположения в точке регистрации) содержит большую погрешность (2 мм/год и более по скорости). На этой карте также отчетливо видна пограничная зона орогенов и щита. Обращает на себя внимание неравномерность поля. В некоторых случаях значения вертикальной скорости, вероятно, ошибочны по указанной причине. Таким образом, технология высокоточных измерений координат точек земной поверхности на базе GPS дает исходный материал для последующей интерпретации и выводов о геодинамическом состоянии региона на основе полей скоростей. Непосредственно эта информация заключена в неоднородностях поля, отражающих деформационные процессы в земной коре. Методика извлечения этой информации и истолкование являются самостоятельным этапом изучения современных движений. Основы методики будут рассмотрены в последующих статьях.

В заключение отметим, что имеющийся задел и накопленная база данных по современным движениям на территории Республики Казахстан пока явно не достаточны для решения многообразных вопросов геодинамического характера. Ясно лишь то, что уже полученные результаты указывают на отсутствие альтернативных подходов в решении проблемы. При этом очевидно, что исследования должны выполняться по единой программе, учитывающей априорные данные по геодинамике регионов. С учетом специфики отдельных задач сети наблюдений также должны создаваться для разных регионов независимо, но на общей геодезической основе. Это исключит проблемы в увязке данных по регионам.

В целом мониторинг должен предусматривать развитие сетей разного назначения и уровня, включая региональные, локальные и перманентные. Большая часть пунктов региональной сети, вероятнее всего, может быть организована по уже отработанной технологии временных маскируемых пунктов с минимальными затратами. Вариант, принятый в Японии и состоящий в использовании по сути перманентной сети из стандартных неохраемых пунктов-обелисков, для условий Казахстана явно не подходит, так как в наших условиях невозможно гарантировать сохранность пунктов и обеспечить финансирование на изготовление оборудования и установку пункта в размере выше 100 тыс. долл. США на каждый.

Мониторинг современных движений на территории республики должен в организационном плане опираться на единство производственно-прикладных работ по созданию сети, ведению измерений и первичной обработке данных и на научные фундаментальные и прикладные исследования по интерпретации и прогнозу геодинамического состояния регионов. Должны быть предусмотрены и совместные исследования на сопредельных территориях государств в связи с общностью проблем и задач.

Данные о современных движениях и соответствующих им деформационных процессах, несомненно, должны учитываться при сейсмическом районировании, так как именно они являются прямым отражением реально протекающих процессов подготовки будущих возможных крупных сейсмических событий.

Единая система организации сетей мониторинга и взаимная увязка данных должны составить исключительно благоприятные условия для формирования научно обоснованного прогноза геодинамического состояния коры и литосферы, что обеспечивается достигаемой представительностью данных по охвату территории, точности и, как следствие, объективностью этих результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вартанян Г.С., Гончаров В.С., Кривошеев В.И. и др. Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система R-STERS). М., 2000, 78 с.

2. Нусипов Е., Сидоров В.А., Рахымбаев М.М. и др. Геодинамическая безопасность освоения месторождений углеводородов Казахстана (концепция) Алматы, 2002. 48 с.

3. Нусипов Е., Щерба Ю.Г., Рахымбаев М.М. и др. Методическое руководство по ведению мониторинга современных движений высокоточными спутниковыми GPS-наблюдениями для прогноза геодинамического состояния территорий и нефтегазовых месторождений. Алматы, 2004. 134 с.

4. Нусипов Е.Н., Рахымбаев М.М., Оспанов А.Б., Стихарный А.П., Щерба Ю.Г. Мониторинг современных движений природного и техногенного происхождения на основе высокоточных GPS-наблюдений в Прикаспийской впадине // Доклады казахстанско-российской международной конференции, посвященной году России в Казахстане 22-24 июня 2004 года. Алматы, 2005.

5. Нусипов Е., Оспанов А.Б., Тимуш А.В. и др. Сейсмическая опасность трассы нефтепровода Атасу-Алашанкоу. Алматы, 2004. 101 с.

6. Зубович А.В., Бейсенбаев Р.Т., Ван Сяочан, Джан Юнфен, Кузиков С.И., Мосиенко О.И., Нусипов Е.Н., Щелочков Г.Г., Щерба Ю.Г. О некоторых результатах анализа кинематики Тянь-Шаня и окружающих районов по данным GPS-наблюдений // Доклады казахстанско-российской международной конференции, посвященной году России в Казахстане 22-24 июня 2004 года. Алматы, 2005.

7. Макаров В.И., Абдрахматов К.Е., Айтматов И.Т. и др. Современная геодинамика внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). М.: Научный мир, 2005. 400 с.

8. Шацков В.И., Горбунов П.Н., Тихомиров А.И. Геофизическая и геодинамическая характеристики очаговых зон сильных землетрясений Северного Тянь-Шаня // Геология Казахстана. 2001. №2. С. 24-38.