

УДК 528.2

**ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РЕГИОНЕ  
ПОВОЛЖЬЯ ПО ДАННЫМ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ**

*Р.А. Кащеев, В.Ф. Бахтияров, Р.В. Загретдинов,  
Р.В. Комаров, А.Е. Сапронов*

**Аннотация**

В статье обсуждаются результаты применения методов спутникового позиционирования для установления современных движений земной коры в регионе Поволжья. Представлены данные спутниковых измерений на референчных станциях Республики Татарстан, относящиеся ко времени разрушительного землетрясения Тохоку, произошедшего в Японии 11 марта 2011 г. Показано, что вследствие землетрясения эти пункты испытали заметные короткопериодические смещения в горизонтальной плоскости.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), современные движения земной коры (СЗДК), результаты спутникового позиционирования.

---

Настоящая работа продолжает начатое в статье [1] обсуждение результатов наземных спутниковых измерений, выполненных на территории региона Поволжья в 2008–2010 гг. с целью геодинимического мониторинга современных движений земной коры (СЗДК).

Хорошо известно, что к числу важнейших достоинств спутниковых методов позиционирования относятся их высокая точность и оперативность, открывающие широкие возможности изучения динамики регионов, характеризующихся активностью тектонических процессов. Поскольку Республика Татарстан (РТ) находится в одной из зон повышенной активности Русской платформы, изучение сейсмичности ее территории представляется необходимым и актуальным как с точки зрения обеспечения геодинимической безопасности высокоурбанизированного региона, так и вследствие важности исследования природы и процессов нефтегазообразования с целью прогноза нефтеперспективных объектов. Напомним, что начиная с 1985 г. на территории Татарстана было зафиксировано около 100 землетрясений силой 4–5 и даже 6 баллов. Большинство эпицентров сгруппировано вдоль Алтунино-Шунакской разломной зоны и Прикамской системы разломов, являющихся индикаторами новейших и современных тектонических движений. Кроме того, сейсмическая активность проявляется и по другим разломам фундаментов Южно-Татарского свода (I), приуроченным к Ромашкинскому и Ново-Елховскому месторождениям [2] (см. рис. 1).

На этом же рисунке приведено расположение спутниковых станций, на которых выполнялись рассматриваемые ниже наблюдения: KAZN (КФУ, г. Казань),

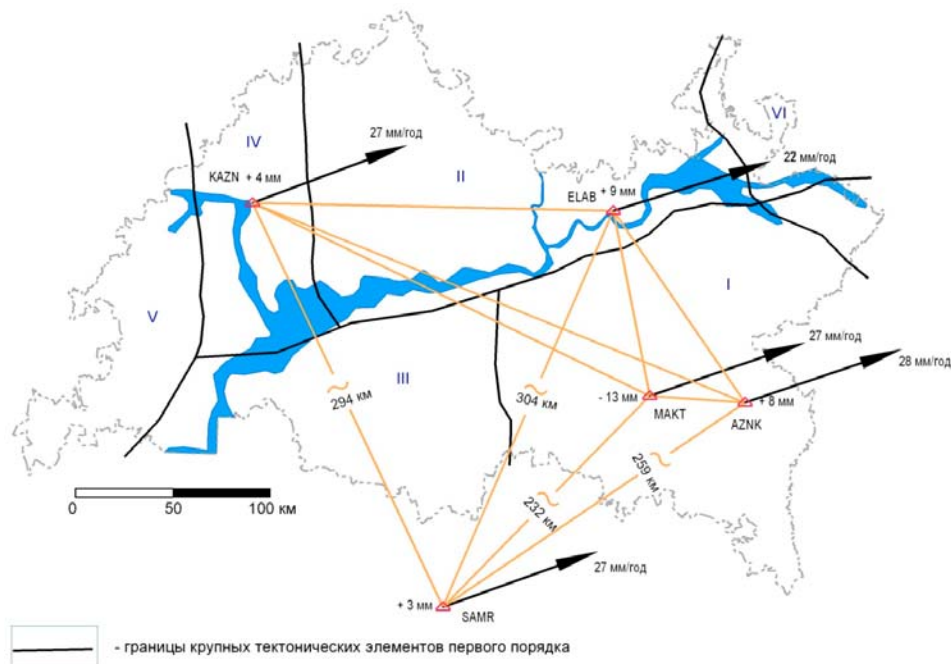


Рис. 1. Карта-схема современных движений земной коры на фоне основных тектонических разломов: I – Южно-Татарский свод, II – Северо-Татарский свод, III – Мелекеская впадина, IV – Казанско-Кировский прогиб, V – Токмовский свод, VI – Камско-Бельский авлакоген

AZNK (г. Азнакаево), ELAB (г. Елабуга), МАКТ (г. Альметьевск), SAMR (г. Самара), КСНР (г. Кирово-Чепецк). Каждому пункту соотнесены полученные в статье [1] вектора планового смещения, основной составляющей которых являются вековые сдвиги базовых станций в направлении на северо-восток со скоростью от 20.90 (ELAB) до 26.34 мм/год (AZNK) и в направлении на север со скоростью от 6.54 (ELAB) до 9.50 мм/год (KAZN). Указанное смещение отражает вековое движение Евразийской литосферной плиты и хорошо согласуется с моделью глобального движения тектонических плит.

Понятно, что осуществление геодинимического мониторинга предъявляет максимально высокие требования как к качеству и точности используемых наблюдательных данных, так и к возможностям и точностным показателям программных средств их обработки. Наиболее существенными источниками ошибок, которые возможно выявить в процессе предварительного анализа наблюдений (предобработки), являются: ионосферные задержки сигнала и скорости их изменения, воздействие переотраженных сигналов (так называемая многолучевость или многопутность) и срывы счета циклов фазы несущей.

Для процедуры оценки качества наблюдательных данных наилучшим образом подходит свободно распространяемая и доступная на сайте производителя программа TEQC (Translating, Editing, Quality Checking) [3]. Эта утилита предназначена для конвертирования исходных бинарных файлов различных форматов, зависящих от типа ГНСС-приемника, в универсальный текстовый формат (RINEX – Receiver Independent Exchange Format), понятный большинству

программ обработки спутниковых измерений, а также редактирования файлов ГНСС-измерений и оценки качества. В режиме оценки качества измерений программа TEQC на основе RINEX-файлов формирует файлы отчета, где содержится вся необходимая для оценки качества информация, а также файлы графиков в формате UNAVCO COMPACT.

Выполненная нами согласно описанной методике оценка качества измерений позволяет сформулировать следующие выводы. Наихудшее качество принимаемых сигналов соответствует пункту ELAB, среднее качество характеризует станции AZNK и МАКТ, высокое качество измерений соответствует пунктам KAZN и SAMR. Практически для всех рассмотренных станций велико влияние многолучевости на обеих рабочих частотах до углов возвышения спутников 30–40°, что вызвано, по-видимому, наличием отражающих поверхностей вблизи антенн этих станций, поскольку все станции расположены на крышах зданий. Отметим, что в целом качество ГНСС-измерения для рассмотренных нами пунктов соответствует среднему уровню и данные наблюдений могут быть использованы для дальнейшего геодинимического анализа.

Заметим в этой связи, что достоверность, качество и высокая чувствительность измерений, выполняемых на территории РТ, могут быть наглядно проиллюстрированы их откликом на катастрофическое землетрясение Тохоку в Японии, произошедшее 11 марта 2011 г. в 5:46 (UTC). На рис. 2 представлена деформационная волна, которая прокатилась по всей Земле. Вычисления смещений проводились относительно принадлежащего сети IGS-пункта IRKM (г. Иркутск) для некоторых пунктов Камчатской GPS-сети и ряда геодезических пунктов республиканской сети референчных станций TATPOS [4]. Откладываемые по вертикальной оси величины смещений пунктов по направлениям меридиана (N) и первого вертикала (E) представлены на временном интервале 05:45–06:25 11 марта 2011 г. (горизонтальная ось). Графики расположены сверху вниз по мере удаления пунктов от эпицентра землетрясения: 05:55–06:00 – волна на Камчатке, в интервале 06:01–06:03 произошли смещения опорного пункта IRKM, а примерно в 06:12 волна достигла Татарстана. Размах деформационной волны в Татарстане, приуроченной к интервалу 06:12–06:19, составил около ~80 мм по меридиану и около ~60 мм по параллели. Поскольку погрешность измерения смещения по высоте в несколько раз превышает погрешность измерения горизонтальных смещений пунктов, сигнал вертикальной компоненты смещений здесь практически не обнаруживается и потому не приводится.

Следует отметить, что землетрясение Тохоку стало первым сейсмическим событием такого масштаба, инструментально зарегистрированным спутниковыми средствами на геодезических пунктах Российской Федерации [5].

Выполняемое на ГНСС-пунктах высокоточное определение смещений фазовых центров спутниковых антенн позволяет выявлять вертикальные и горизонтальные движения тектонических элементов 1-го порядка, на которых расположены базовые станции. Наиболее чувствительными элементами к смещениям в этом случае являются изменение превышения высот пары точек, стягиваемых исследуемым вектором, и изменение расстояния между станциями.

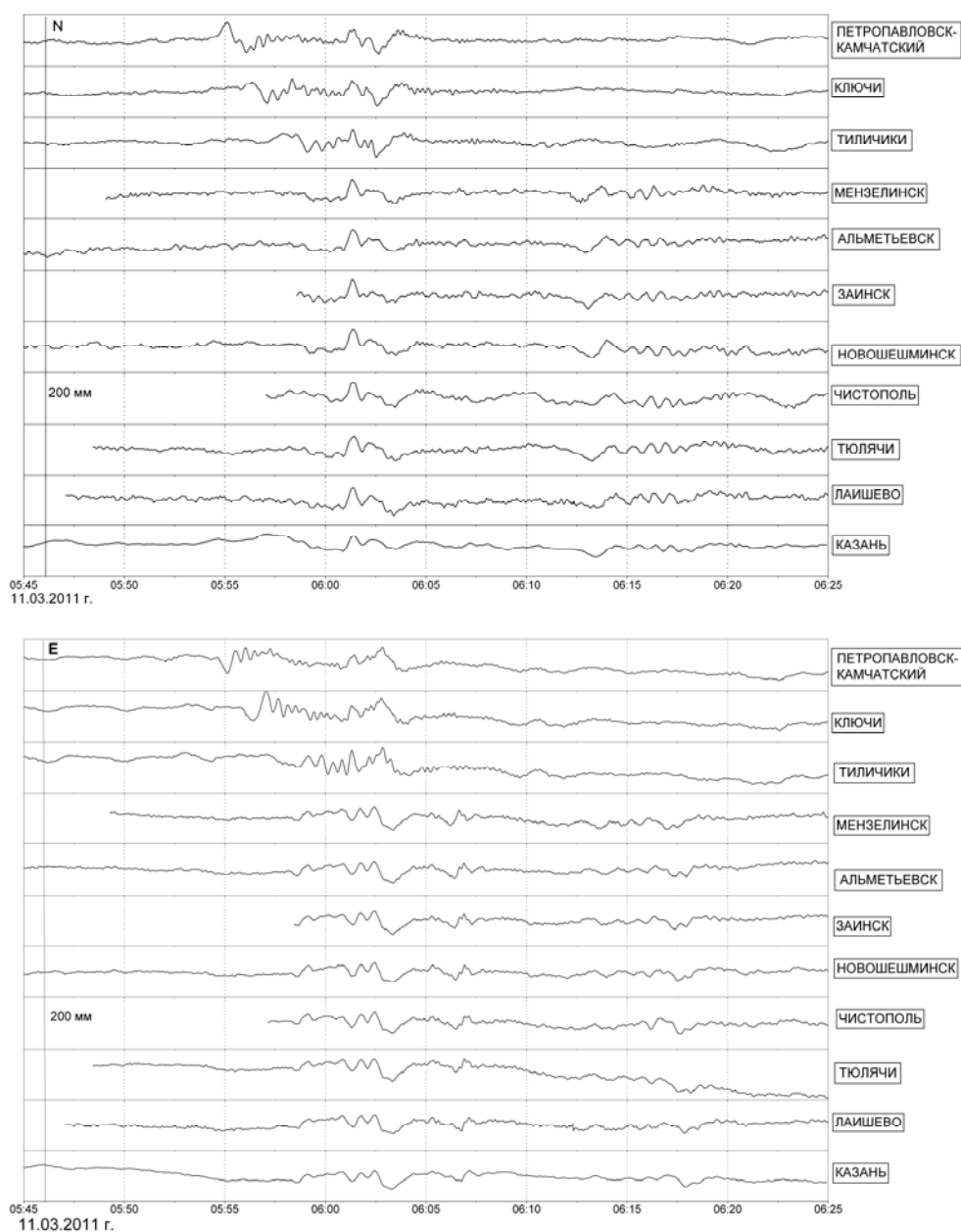


Рис. 2. Кинематические смещения геодезических пунктов сети референционных станций Камчатки (Петропавловск-Камчатский, Ключи, Тилички) и РТ по направлениям меридиана (N) и первого вертикала (E) относительно IRKM (г. Иркутск)

В табл. 1 представлены результаты обработки спутниковых наблюдений 2008–2010 гг., относящихся к пяти векторам KAZN – AZNK, KAZN – ELAB, KAZN – MAKT, KAZN – SAMR, KAZN – KCHP.

В первом столбце таблицы помимо наименований стягиваемых вектором ГНСС-пунктов приводятся интервал времени, в течение которого выполнялись использованные здесь измерения и их количество. Второй столбец содержит

Табл. 1

Результаты обработки спутниковых наблюдений 2008–2010 гг.

Вектор	Характеристика	Скорость, мм/год	Период, мес.	Амплитуда, мм
KAZN – AZNK 2008,01–2010,806 507 набл.	$dU$	1.14	5.9	1.83
			2.9	1.53
			12.3	1.52
	$dL$	0.14	5.8	0.69
			3.9	0.63
8.3			0.61	
KAZN – ELAB 2009,074–2009,809 208 набл.	$dU$	-9.25	3.9	1.42
			8.8	1.33
	$dL$	4.17	5.0	0.73
			1.7	0.53
KAZN – МАКТ 2008,915–2010,577 564 набл.	$dU$	-13.69	13.2	6.17
			6.0	3.52
			3.0	1.94
	$dL$	-0.35	15.7	0.74
KAZN – SAMR 2008,003–2008,984 352 набл.	$dU$	-2.09	2.6	1.88
			5.2	1.50
			11.7	1.32
	$dL$	-0.38	6.7	0.46
KAZN – КСНР 2009,822–2010,699 319 набл.	$dU$	5.92	2.5	2.47
			8.4	2.23
			0.9	1.56
	$dL$	1.03	7.0	0.98

обозначение исследуемой характеристики вектора:  $dU$  – изменение превышения высот стягиваемых точек,  $dL$  – изменение расстояния между этими точками. Скорости, описывающие линейный тренд изменения этих характеристик, приводятся в третьем столбце. Содержание четвертого и пятого столбцов составляют полученные в результате гармонического анализа данных измерений временные и амплитудные характеристики наиболее значимых гармоник.

Максимальные значения скорости изменения превышения высот соответствуют трем векторам: KAZN – МАКТ (-13.69 мм/год), KAZN – ELAB (-9.25 мм/год), KAZN – КСНР (5.92 мм/год), минимальные – векторам KAZN – SAMR (-2.09 мм/год) и KAZN – AZNK (1.14 мм/год). Значительное расхождение в значениях скорости изменения превышения высот для близко расположенных пунктов AZNK и МАКТ, по-видимому, может быть интерпретировано как следствие долговременной добычи нефти в окрестности г. Альметьевска (пункт МАКТ), о чем уже упоминалось нами в работе [1]. Максимальное значение скорости изменения расстояний соответствует вектору KAZN – ELAB (4.16 мм/год), длины остальных векторов не претерпели заметных изменений на интервале измерений.

Таким образом, возможно утверждать, что согласно данным табл. 1 величины относительных смещений тектонических элементов по вертикали значительно превышают значения их относительных смещений по плановым координатам. В пользу этого вывода свидетельствует и сравнение амплитуд периодической

составляющей изменений расстояний между пунктами с одной стороны и превышений высот между ними же – с другой. Если амплитуды изменений расстояний не превышают 1 мм (вектор KAZN – SAMR), то амплитуды периодических изменений превышений высот в несколько раз больше и достигают значения 6.2 мм (вектор KAZN – МАКТ).

Что касается частотных характеристик периодической составляющей изменения превышений высот пунктов сети, то для векторов KAZN – AZNK, KAZN – МАКТ и KAZN – SAMR доминируют в основном сезонные компоненты, с периодами, близкими к 12, 6 и 3 месяцам. Для вектора KAZN-ELAB наибольшее значение амплитуды 1.4 мм достигается гармоникой с периодом 3.9 месяца, а для вектора KAZN – КСНР максимальное значение амплитуды изменения превышения 2.5 мм – гармоникой с периодом 2.5 месяца. В то же время несколько меньшие значения амплитуд для этих двух векторов (1.3 и 2.2 мм соответственно) имеют составляющие изменения превышений высот с близкими периодами – соответственно 8.8 и 8.4 месяца.

Таким образом, предварительная модель вертикального движения блоков земной коры может быть описана суммой долгопериодических сезонных смещений с годовым, полугодовым и трехмесячным периодами, на которую в ряде случаев (здесь вектор KAZN – МАКТ) может накладываться непериодический тренд, обусловленный причинами техногенного характера. Наиболее вероятное объяснение сезонных изменений высот пунктов, по-видимому, следует искать в сезонном изменении уровня грунтовых вод [6]. Однако, как уже указывалось выше, вектор KAZN – МАКТ выделяется на фоне остальных векторов не только значительным опусканием пункта МАКТ, но и большими значениями амплитуд годовых и полугодовых изменений превышений высот (6.2 и 3.5 мм), что может свидетельствовать о существовании более сложного механизма воздействия техногенных факторов на периодическую составляющую вертикального смещения блоков.

### Summary

*R.A. Kascheev, V.F. Bakhtiarov, R.V. Zagretdinov, R.V. Komarov, A.E. Sapronov. Geodynamical Researches in the Middle Volga Region Based on GNSS Measurements.*

This article discusses the results of application of satellite positioning methods for the detection of the current earth movements in the Middle Volga region. The data of satellite measurements made on the reference stations of the Republic of Tatarstan on the 11th of March, 2011 during the catastrophic earthquake in Tohoku (Japan) are presented. It is shown that as a result of this earthquake, the reference stations had remarkable short-period displacements in the horizontal plane.

**Key words:** global satellite navigation systems (GNSS), modern earth crust movements, satellite positioning data.

### Литература

1. *Кащеев Р.А., Бахтияров В.Ф., Загреддинов Р.В., Комаров Р.В.* О некоторых результатах и перспективах применения спутниковых технологий для геодинамического мониторинга движений земной коры на территории Республики Татарстан // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2010. – Т. 152, кн. 4. – С. 33–39.

2. *Войтович Е.Д., Гатиятуллин Н.С.* Тектоника Татарстан. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2003. – 132 с.
3. TEQC – The Toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS Data. – URL: <http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>, свободный.
4. *Кашеев Р.А., Загретдинов Р.В., Комаров Р.В.* Проект сети постоянно действующих станций для обеспечения высокоточного координатно-временного поля на территории Республики Татарстан // Изв. Казан. гос. арх.-строит. ун-та. – 2009. – № 2(12). – С. 62–65.
5. *Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Охзоно М.* Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г., и их влияние на результаты GNSS-наблюдений // Геодезия и картография. – 2011. – № 8. – С. 35–43.
6. *Горшков В.Л., Смирнов С.С., Щербакова Н.В.* Влияние нагрузочных эффектов в ГНСС наблюдениях на результаты геодинимических исследований // Тез. докл. 4-й Всерос. конф. «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2011). – СПб.: ИПА РАН, 2011. – С. 154–155.

Поступила в редакцию  
24.10.11

---

**Кашеев Рафаэль Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Rafael.Kascheev@ksu.ru](mailto:Rafael.Kascheev@ksu.ru)

**Бахтиаров Вилорий Фаритович** – научный сотрудник Камчатского филиала Геофизической службы РАН.

E-mail: [vila@emsd.ru](mailto:vila@emsd.ru)

**Загретдинов Ренат Вагизович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Renat.Zagretdinov@ksu.ru](mailto:Renat.Zagretdinov@ksu.ru)

**Комаров Руслан Викторович** – ассистент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Ruslan.Komarov@ksu.ru](mailto:Ruslan.Komarov@ksu.ru)

**Сапронов Алексей Евгеньевич** – аспирант кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Aleksej.Sapronov@ksu.ru](mailto:Aleksej.Sapronov@ksu.ru)