

$I_0 = 7$  (Республика Тува) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: 2014. С. 378–385.

*Зятькова Л.К.* Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: «Наука», 1977. – 215 с.

*Опарин В.Н., Сашурин А.Д., Кулаков Г.И. и др.* Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.

*Парфеевец А.В., Саньков В.А.* Напряжённое состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. – 151 с.

*Растворова В.А., Цибульчик И.Д.* Урэг-Нурское землетрясение 15.V.1970 г. в Северо-Западной Монголии // Вопросы инженерной сейсмологии, 1984. Вып. 25. С. 120–124.

*Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д., Захаров В.С., Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсюченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С.* Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основы реального сейсмического прогноза. М. : Светоч Плюс, 2011. – 368 с.

*Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмотектоники. М. : ИФЗ РАН, 2012. – 340 с.

*Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Аишурков С.В.* Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряжённость деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Геотектоника, 2011. № 5. С. 52–70.

УДК 551.24.312

## **ДИАГНОСТИКА ВАРИАЦИЙ ПОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ**

***Ж.Ш. Жантаев, А.В. Виляев***

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан

Представлены результаты обработки GPS-мониторинга в сейсмоактивной области Казахстана. За период измерений 2009–2016 гг. из суммарного сигнала выделены циклические компоненты смещений для каждой GPS станции. Решена задача определения параметров напряженно-деформированного состояния земной коры по вариациям скоростей движений. Отмечается, что эпицентры сильных землетрясений пространственно совпадают с экстремумами деформаций сжатия–растяжения при учете сезонных циклов. Формирование аномальных деформационных зон может рассматриваться как триггерный процесс развития очага возможного землетрясения.

## Введение

В изучении современных движений земной поверхности активно используются методы космической геодезии. Определение скорости движения земной поверхности по наблюдениям GPS станций осуществляется по линейному тренду временных рядов суточных координат. В то же время большинство временных рядов GPS содержат периодическую (годовую и полугодовую) составляющую с амплитудами соизмеримыми с линейным трендом. Считается, что при продолжительном геодиническом мониторинге движений поверхности периодом более 4,5 лет сезонные вариации GPS сигнала не оказывают влияния на точность линейного тренда [Blewitt and Lavalle, 2002]. Однако, как показывают последние исследования, годичные циклы вносят значительный вклад в оценку линейного тренда [Bos et al., 2010], и, следовательно, в оценку деформационных процессов, имеющих практическое значение при изучении региональных тектонических движений и геодинических предвестников землетрясений [Трофименко и др., 2013]. Исключая ошибки аппаратуры и математической обработки, причиной сезонных вариаций могут быть изменения атмосферной нагрузки [Van Dam et al., 1997], гидрологическое воздействие уровня подземных вод [Van Dam et al., 2001], сезонные температурные эффекты [Romagnoli et al., 2003].

В настоящее время для сейсмоактивной территории Северного Тянь-Шаня накоплены данные исследований современных движений методами космической геодезии [Надилов и др., 2014; Курскеев, 2011; Зубович и др., 2001; Жантаев и др., 2013]. Цель работы заключалась в изучении закономерностей вариаций движения GPS пунктов как экспериментальной основы динамики поля напряженно-деформированного состояния (НДС) приповерхностных участков земной коры.

## Исходные данные

Исходными данными послужили результаты наблюдений на стационарных GPS станциях за период 2009–2016 гг. Пункты расположены в сейсмоопасной зоне с возможной сотрясаемостью до 9-ти баллов в районе хребта Заилийский Алатау, а также в переходной области к асейсмичной части Казахского щита. Измерения выполнены двухфазными GPS приемниками LEICA GPS1200, TRIMBLE 4000SST, ROGUE SNR-8000. Дискретность взятия отсчетов составляла 30 сек. Обработка сигналов осуществлена программным комплексом GAMIT/GLOBK. Ежедневные среднесуточные решения объединялись в системе координат ITRF2008 с результатами измерений 23 станций IGSS сети. В результате вычислены абсолютные значения смещений по долготе, широте и высоте в каждом пункте наблюдений относительно Евразийского континента. Точность определения координат составила в плане 0,3 мм по высоте 3,6 мм.

По линейному тренду установлено субмеридиональное движение отдельных блоков земной коры в северном направлении со скоростями  $1 \div 5$  мм/год и знакопеременное движение со скоростями до 2 мм/год по модулю для компоненты запад-восток. По вертикали наблюдается поднятие западной части территории с амплитудой  $1,2 \div 4,0$  мм/год (рис. 1). Компоненты смещений и их линейный тренд показаны на примере пункта TURG (рис. 2). Сезонная декомпозиция осуществлена для соответствующих направлений вычетом линейных трендов. Далее, методом наложения эпох, определены средние значения смещений каждого GPS пункта на каждый день года.

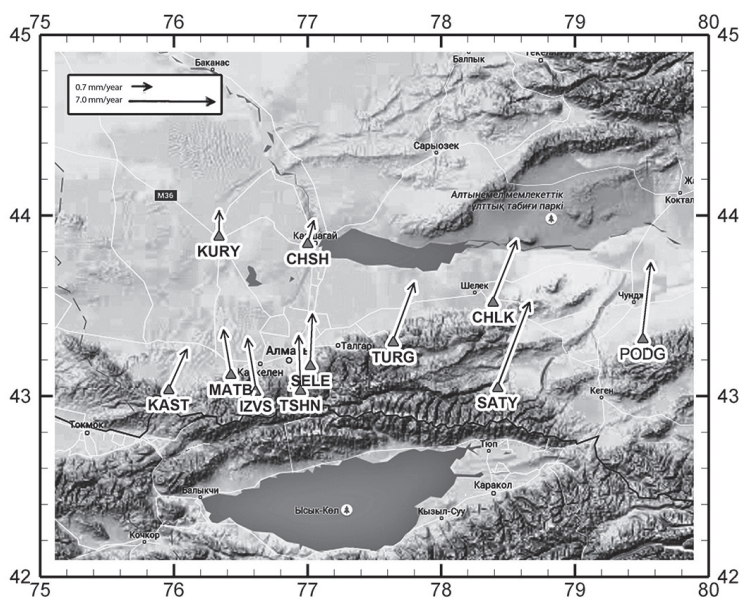


Рис. 1. Расположение GPS пунктов и векторы горизонтальной скорости движения, вычисленные по линейному тренду

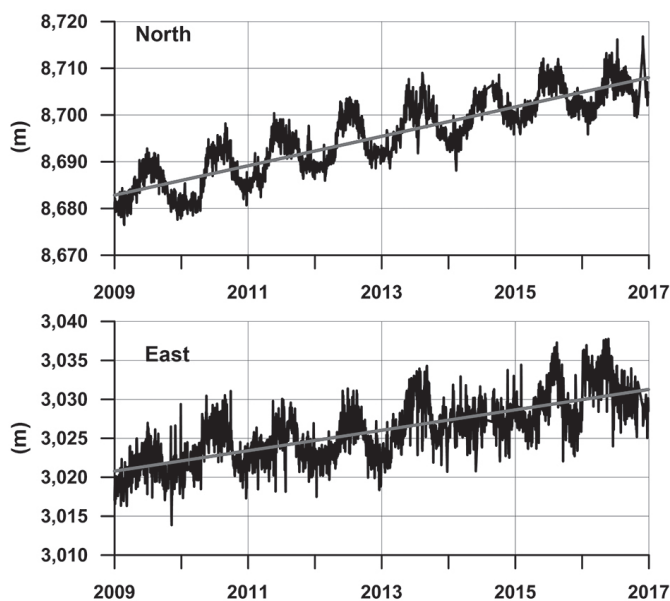


Рис. 2. Компоненты смещения GPS пункта TURG по направлениям N и E

Установлено ежегодное устойчиво-направленное вращательное движение пунктов в горизонтальной плоскости. На рис. 3 представлена динамика смещения некоторых GPS пунктов, аппроксимируемая эллипсом. Амплитуда циклических перемещений, определяемая по главным осям эллипса, изменяется от 2 до 4 мм в

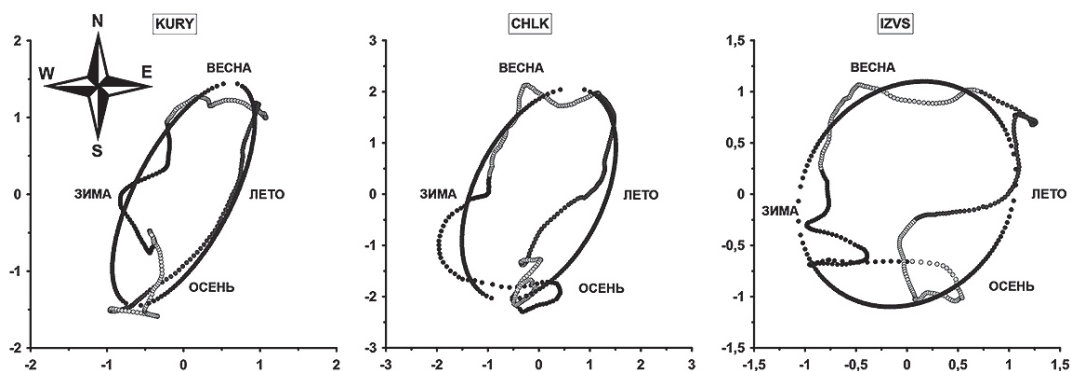


Рис. 3. Динамика смещений (мм) некоторых GPS пунктов в плане

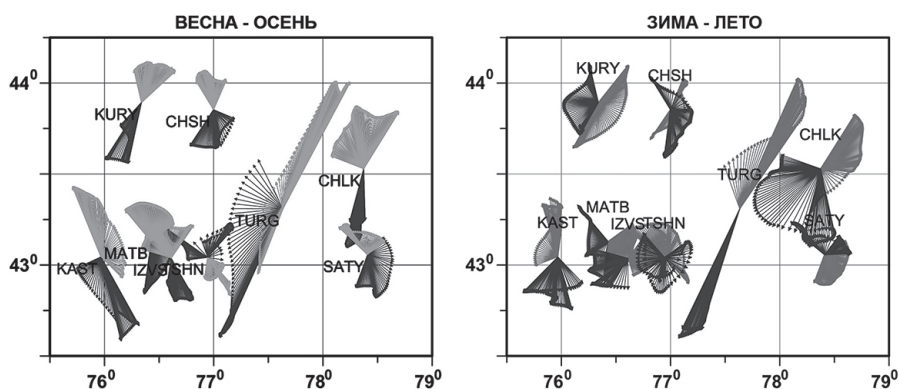


Рис. 4. Динамика вектора горизонтальных смещений GPS пунктов (масштаб векторов по пунктам относительный для лучшей визуализации)

сезон на фоне систематических трендовых не более 5,3 мм/год. Центр эллипса сезонных перемещений движется со скоростью и по направлению, определяемым основным линейным трендом GPS пункта. В весенне-летний период преобладает северо-восточное направление сезонных движений, в осенне-зимний – юго-западное (рис. 4). Данный результат получен как для пунктов Северного Тянь-Шаня, так и для некоторых рассмотренных международных GPS станций (ARTU). Аналогичная цикличность движений наблюдалась также в области Алданского щита [Трофименко и др., 2013] и территории Южной Якутии [Трофименко и Гриб, 2012]. Модель движения земной поверхности определена суперпозицией соответствующих компонент векторов скоростей линейного тренда и сезонных смещений по главным осям эллипсов.

В пределах координат  $N42^{\circ}\div N45^{\circ}$  и  $E75^{\circ}\div E80^{\circ}$  интерполяцией в узлах прямоугольной сети размером  $10\times 10$  км составлены схематические карты горизонтальной скорости движения территории Северного Тянь-Шаня с учетом сезонных вариаций (рис. 5). Далее, компоненты скорости смещений в узлах сети интерпретированы как составляющие тензора деформаций. Земная кора аппроксимирована простейшей моделью сплошной однородной среды. Для расчетов НДС применена мате-

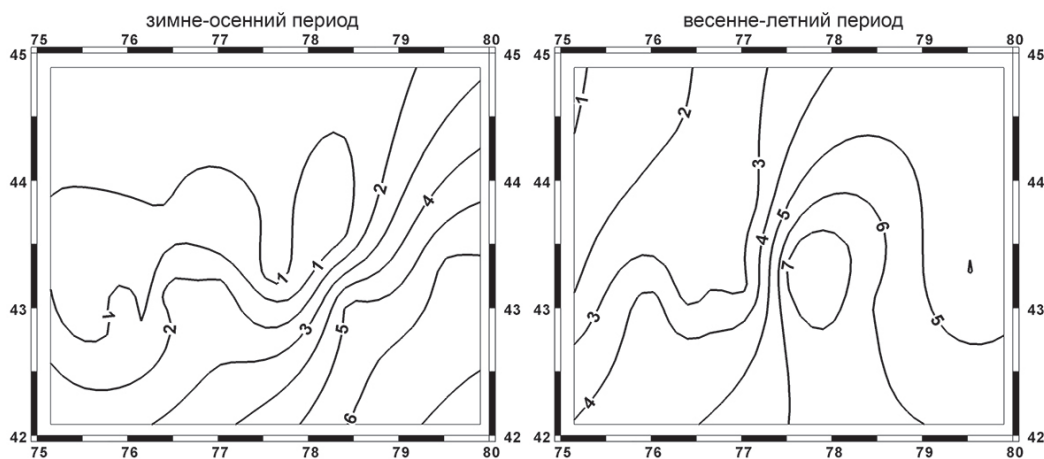


Рис. 5. Сезонная динамика скорости движения земной поверхности (мм/год)

матическая теория механики деформируемого тела без учета факторов времени и температуры. Связь между напряжениями и деформациями принята линейной, то есть соответствующей закону Гука. Основные параметры деформаций вычислены по общим соотношениям [Jaeger et al., 2007].

### Полученные результаты и обсуждение

Формирование НДС и сейсмичности земной коры Северного Тянь-Шаня обусловлено движением Индийской плиты в направлении Евразийской в область юж-

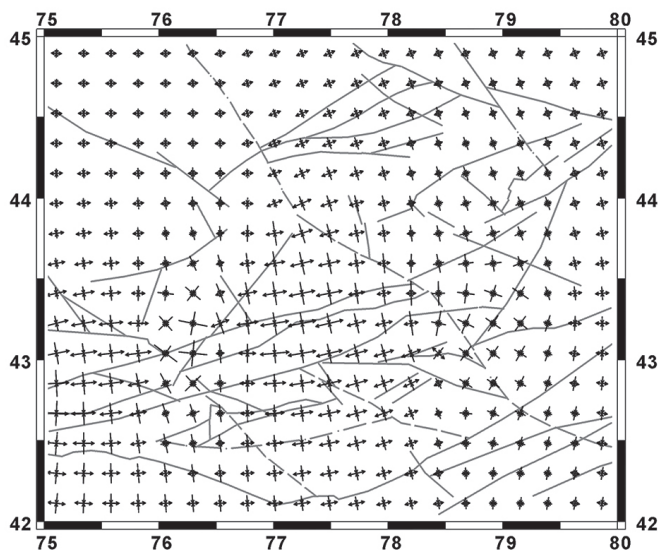


Рис. 6. Схема азимутального направления главных осей деформаций сжатия–растяжения

ных границ стабильного Казахского щита, что приводит к деформированию земной коры. Ориентация главных осей (principal axes) и амплитуда параметров деформаций иллюстрирует пространственное распределение действующих деформационных усилий (рис. 6). Можно выделить блоки земной коры с различными геодинамическим и деформационным режимами как по направлению сдвиговых усилий от субширотных к субмеридиональным, так и по характеру деформаций от линейного растяжения до объемного сжатия.

Ориентация действующих деформаций совпадает с простираем основных сейсмотектонических нарушений региона, выявленных геолого-геофизическими методами и активных в настоящее время [Тимуш, 2011]. Особенностью горизонтальных деформаций максимального сжатия, рассчитанных для низкочастотной составляющей тренда, является наличие области одноосных сжимающих напряжений субширотного простираения, которые вызывают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север до  $30 \cdot 10^{-9}$ . Подобная сейсмотектоническая обстановка характерна для районов Центрального и Южного Тянь-Шаня, где большая часть землетрясений также происходит в условиях субмеридионального сжатия [Зубович и др., 2001]. Современный геодинамический режим территории обусловлен смятием и поперечным (латеральным) сокращением земной коры Тянь-Шаня, сопровождается растягивающими деформациями вдоль продольных зон поднятий и впадин, которые обеспечивают удлинение этих зон по простираению и, тем самым, компенсируют поперечное сокращение коры [Ребецкий и Алексеев, 2014].

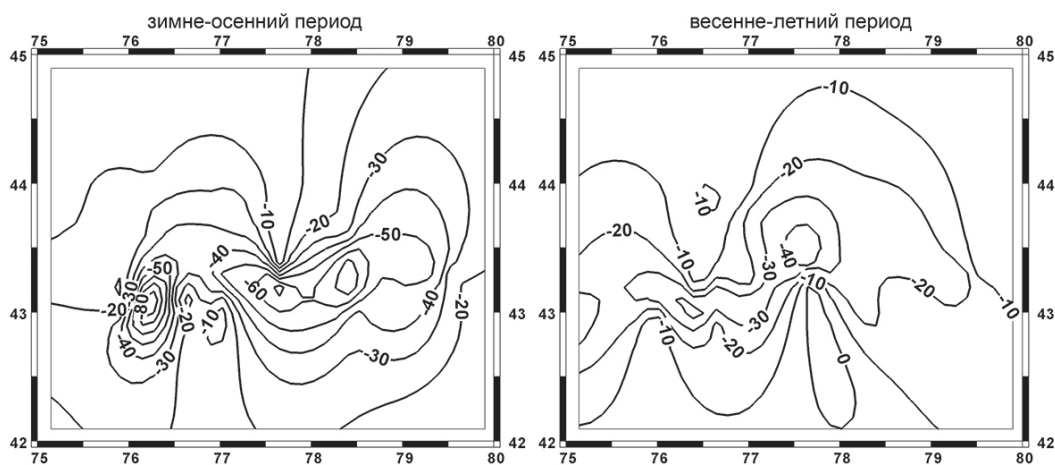
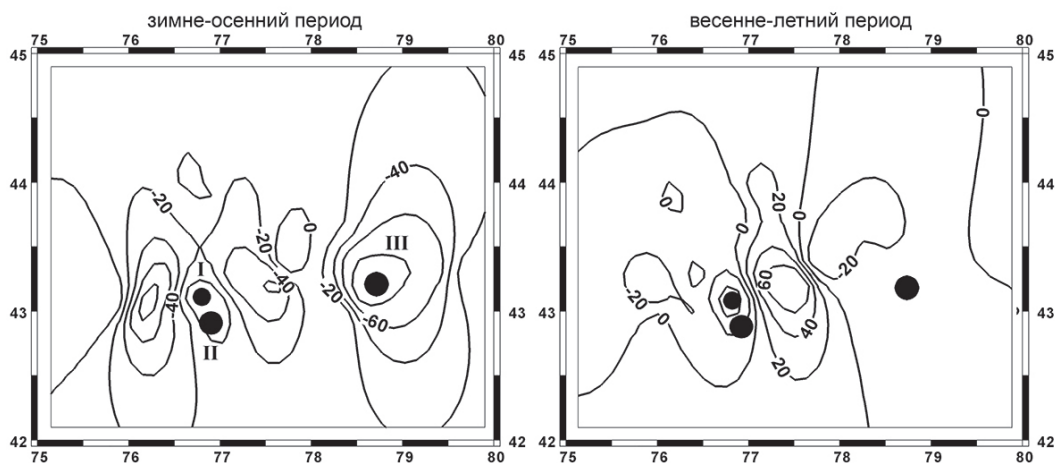


Рис. 7. Динамика сезонных вариаций компоненты сжимающих деформаций ( $10^{-9}$ )

На фоне продолжительных региональных движений, сезонные вариации смещений, регистрируемые на GPS пунктах, значительно изменяют амплитуду деформаций одноосного сжатия в отдельных областях (до  $-85 \cdot 10^{-9}$ ). При этом субширотная ориентация оси сжатия сохраняется (рис. 7). В центральной части территории сезонные девиаторные растяжения, ориентированные субмеридионально, также значительно возрастают до амплитуд свыше  $90 \cdot 10^{-9}$  в сравнении с региональными деформациями ( $26^{-9}$ ).





**Рис. 8.** Динамика сезонных вариаций деформаций сжатия–расширения с эпицентрами землетрясений (I – Верненское  $M_s = 7,4$ ; II – Кеминское  $M_s = 8,1$ ; III – Чиликское  $M_s = 8,2$ )

По распределению максимальных деформаций сжатия–расширения поверхности земной коры Северного Тянь-Шаня в зависимости от времени года установлено, что эпицентры сильнейших землетрясений пространственно совпадают с градиентами вариаций данного параметра и приурочены к областям с амплитудами наибольшего растяжения (рис. 8). Такой характер дислокаций эпицентров подтверждает, что сейсмопроявления сильных землетрясений сопряжены с зонами не накопления сжимающих напряжений, а с накоплением деформаций, понижающих сдвиговую прочность пород, – зонами разгрузки напряжений. При этом деформирование земной коры и сейсмичность являются проявлениями единого геодинамического циклического процесса.

## Выводы

Для Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий установлена пространственная корреляция между характеристиками деформационного поля по данным GPS-мониторинга и распределением сильных землетрясений. Определенное соответствие максимальных проявлений деформационного процесса и сейсмичности дает основание полагать, что они обусловлены общим геодинамическим процессом. Динамика деформационного процесса, прослеживаемая по периодическим сезонным вариациям горизонтальных движений, может служить основой для разработки предиктора формирования очага возможного землетрясения. Применение GPS наблюдений за движениями земной коры является информативным методом оценки напряженно-деформированного состояния и может использоваться в целях сейсмического районирования и оценки сейсмического риска.

*Работа выполнялась в рамках проекта «Разработать методы оценки геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием математического моделирования и спутниковых технологий».*

## Литература

Жантаев Ж.Ш., Виляев А.В., Бибосинов А., Садыков К.А., Асанкулов Н.А. Изучение современных медленных движений земной поверхности Казахстана по данным глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) // Прикладные космические исследования в Казахстане. Алматы. 2013. Т. 9. С. 94–105.

Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д. и др. Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1634–1640.

Курскеев А.К. Современная геодинамика Тянь-Шаня по данным космической геодезии // Известия НАН РК ; серия геологии и технических наук. 2011. № 2. С. 5–17.

Надилов Н.К., Курскеев А.К., Жантаев Ж.Ш. Дифференцированный отклик структур Тянь-Шаня на воздействие космических сил как основа современных геодинамических и сейсмических процессов в литосфере // Известия НАН РК ; серия геологии и технических наук. 2014. № 2. С. 56–69.

Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С. Тектоническое поле современных напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. Вып. 1. С. 257–290.

Тимуш А.В. Сейсмотектоника литосферы Казахстана. Алматы. [б.и.]. 2011.

Трофименко С.В., Гриб Н.Н. Годичная динамика движения GPS пункта «Нерюнгри» // Современная геодинамика Центральной Азии. Иркутск. 2012. С. 189–192.

Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Маршалов А.А. Инерционная модель взаимодействия блоков земной коры по данным GPS–геодезии // Фундаментальные исследования; геолого-минералогические науки. 2013. № 6. С. 111–115.

Blewitt G., Lavalle D. Effect of annual signals on geodetic velocity // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. 21–45.

Bos M.S., Bastos L., Fernandes R.M.S. The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time-series // J. of Geodynamics. 2010. V. 49. P. 205–209.

Jaeger J.C., Cook N.G.W. Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics: 4th ed. Blackwell Publishing. 2007. – 360 p.

Romagnoli C., Zerbini S., Lago L., Richter B., Simon D., Domenichini F., Elmi C., Ghirrotti M. Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations // J. Geodyn. 2003. V. 35 (4–5). P. 521–539.

Van Dam T.M., Wahr J., Chao Y., Leuliette E. Predictions of crustal deformation and of geoid and sea-level variability caused by oceanic and atmospheric loading // Geophys. J. 1997. Int. 129. P. 507–517.

Van Dam T., Wahr J., Milly P.C.D., Shmakin A.B., Blewitt G., Lavalle D., Larson K.M. Crustal displacements due to continental water loading // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 651–654.