

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮЖНО-ЯКУТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА НА ОСНОВЕ GPS ДАННЫХ

С. В. Трофименко, В. Г. Быков

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: trofimenko_sergei@mail.ru*

Поступила в редакцию 14 января 2014 г.

Представлены результаты анализа движения блока земной коры по данным GPS измерений в 2009–2012 гг. на Южно-Якутском геодинамическом полигоне, расположенном на стыке двух крупнейших тектонических структур – Алданского щита Сибирской платформы и Становой складчато-глыбовой области. Юго-восточный дрейф блока соответствует основному азимуту простирания систем активизированных разломов и согласуется с результатами геодезических наблюдений, проведенных в 70–80-е годы XX столетия. По периодическим компонентам полного вектора смещения установлены движения шарнирного типа по локальным разломам. Показано, что в годовых циклах вращательные, колебательные и трансляционные движения блока имеют нелинейный характер, а в зонах активизированных разломов возможно формирование деформационных уединенных волн.

Ключевые слова: современная геодинамика, GPS-геодезия, движение блока, нелинейная модель, Алданский щит, Южно-Якутский полигон.

ВВЕДЕНИЕ

Южно-Якутский геодинамический полигон организован с целью изучения современных геодинамических процессов на стыке двух крупнейших тектонических структур – Алданского щита Сибирской платформы и Становой складчато-глыбовой области [6]. Эти структурные элементы разделяются Становым краевым швом, выраженным сложной системой разновозрастных зон разломов. В современную эпоху характер тектонических движений в регионе наиболее ярко выражен блоковым строением территории. Здесь по геологическим данным выделяется несколько блоков разных размеров и конфигураций, испытывающих различные по направленности, скорости и амплитуде вертикальные и горизонтальные движения [8].

Ведущую роль в тектоническом строении региона играют разрывные нарушения различного ранга, объединяемые в Южно-Якутскую и Становую системы разломов. Южно-Якутская система разломов образована сопряженными зонами нарушений преимущественно взбросо-надвиговой кинематики, осложняющих южную часть Чульманской мезозойской впадины. Доминирующей среди них является плоскость Южно-Якутского взбросо-надвига, представляющего собой региональную тектоническую

границу между докембрийскими образованиями Станового хребта и мезозойскими осадками Южно-Якутской системы впадин [15].

Первые наблюдения горизонтальных смещений в Южной Якутии были проведены в 1954 году. Повторные геодезические измерения в 1979 году позволили авторам [20] на основании статистического анализа сделать заключение об однородности в циклах измерений, отсутствии систематических ошибок измерений, отсутствии линейной и нелинейной статистической связи в измерениях между циклами на 5 % уровне значимости. Тем не менее, полученное при математической обработке и уравнивании геодезической сети векторное поле смещений в отдельных зонах геодинамического полигона оказалось сложным вследствие интерференционных эффектов.

Последующими исследованиями был установлен сложный характер как горизонтальных, так и вертикальных движений блоков, в которых присутствуют зоны субмеридионального растяжения, сопровождающиеся сколовыми правыми сдвигами северо-восточного направления, и подвижки в северо-восточном направлении с возможным разворотом отдельных блоков против часовой стрелки. По результатам повторных нивелировок было установлено рассеянное поле

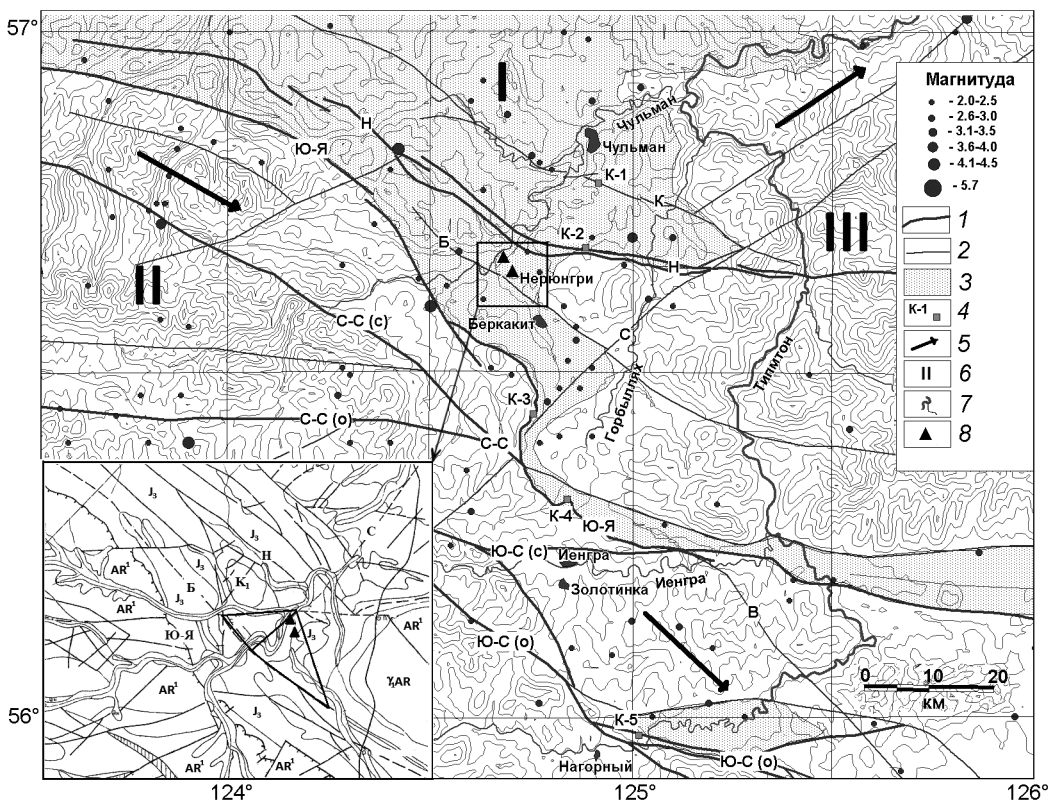


Рис. 1. Блоковое строение, активные разломы и сейсмичность Южной Якутии.

1, 2 – активные разломы (1 – основные, 2 – второстепенные); К – Кабактинский, Н – Нижне-Нерюнгринский, Б – Беркакитский, С – Суннагино-Ларбинский, Ю-Я – Южно-Якутский, В – Верхне-Гонамский, С-С (с) – Северо-Становой (северная ветвь), С-С (о) – Северо-Становой (основная ветвь), Ю-С (с) – Южно-Становой (северная ветвь), Ю-С (о) – Южно-Становой (основная ветвь); 3 – мезозойские отложения мезозойско-кайнозойских впадин; 4 – места детального изучения зон активных разломов в горных выработках; 5 – направление векторов горизонтальных смещений блоков земной коры эпохи 70-х годов 20-го века; 6 – блоки земной коры по геодинамическим данным (I – Чульманская депрессия, II – Зверевский, III – Горбыляхский); 7 – элементы речной сети; 8 – пункты GPS-измерений. Вставка (прямоугольник) – фрагмент структурно-геологической карты масштаба 1:25 000 района г. Нерюнгри.

скоростей вертикальных движений реперов, что проинтерпретировано как деформационная активность структур блоков с разными скоростями движения [9].

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВ

Для исследования современной геодинамики указанной территории использованы результаты непрерывных GPS-измерений вертикальных и горизонтальных смещений в пунктах «Нерюнгри» (NRGR) и «Нерюнгри-2» (NRG2), организованных Институтом земной коры СО РАН и Техническим институтом Северо-Восточного федерального университета в 2009 и 2011 годах, соответственно.

В тектоническом отношении пункт NRGR расположен на микроблоке Чульманской депрессии (рис. 1, блок I). Северное ограничение блока, на котором находится GPS пункт, связано с Нижне-Нерюнгринской зоной разломов, расположенной в пределах прина-

двиговой зоны Чульманского прогиба, представляющей собой сложно дислоцированную область, разбитую многочисленными разломами взбросо-надвигового, сдвигового и сбросового типа. Вблизи пункта регистрации южная ветвь Нижне-Нерюнгринского разлома меняет направление с широтного (восточнее р. Чульман) на северо-западное. Южное ограничение блока связано с Беркакитским разломом, расположенным в принадвиговой сложно дислоцированной зоне севернее Южно-Якутского надвига. В современном рельефе Беркакитский разлом имеет отчетливое выражение в виде серии уступов суммарной высотой до 50 м. Восточным ограничением блока является Суннагино-Ларбинская зона разломов правосдвиговой кинематики смещений с незначительной сбросовой компонентой [15]. Смещения по Суннагино-Ларбинскому разлому находятся в тесной взаимосвязи с взбросо-надвиговыми подвижками по Южно-Якутскому разлому, в значительной степени компенсируя

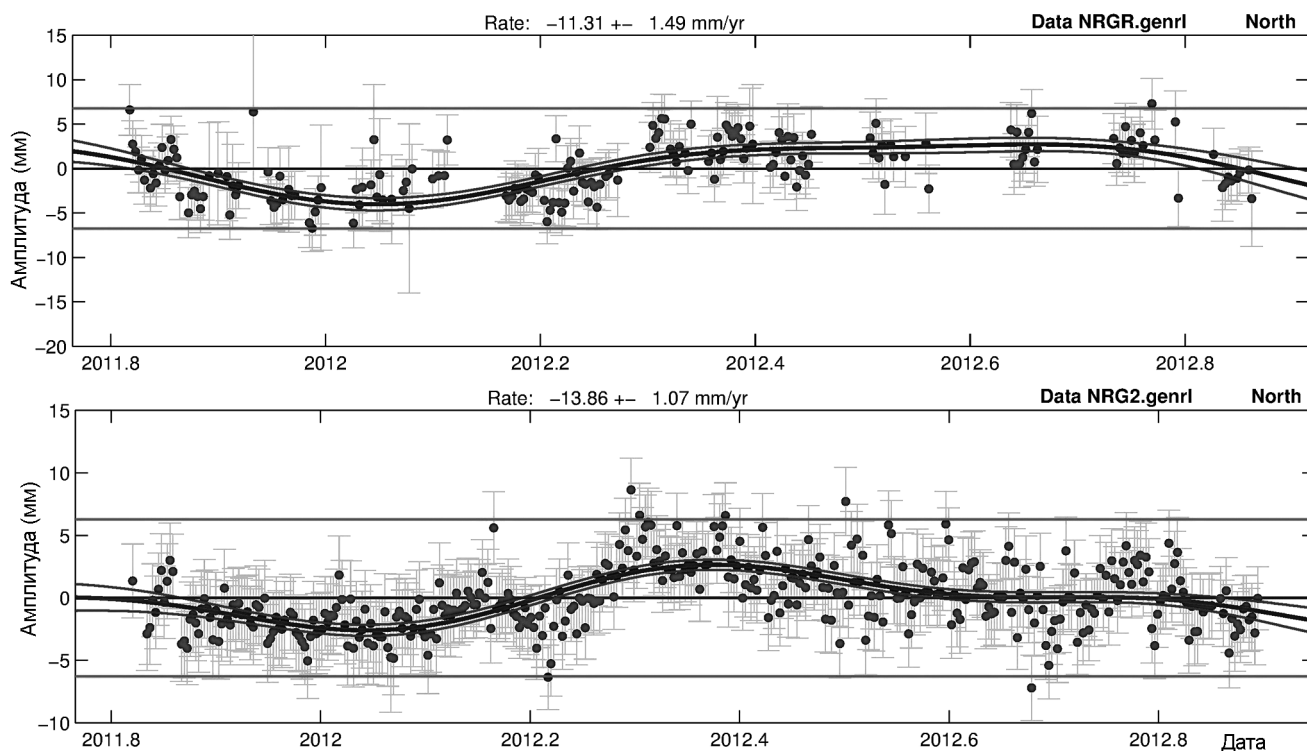


Рис. 2. Динамика компоненты смещения «север-юг» суточных позиций станций NRGR и NRG2.

Здесь и на рис. 3, 4 вековая скорость смещения пункта указана над графиками. Аппроксимирующая кривая вынесена программой первичной обработки данных.

их правосдвиговыми перемещениями. Таким образом, рассматриваемый блок (размером 15×20 км²) может быть вовлечен в различные типы движений и деформаций земной коры в соответствии с кинематикой обрамляющих активизированных разломов.

Второй пункт регистрации NRG2 был заложен примерно в двух километрах южнее пункта NRGR, ближе к зоне влияния Беркакитского разлома. Временные ряды наблюдений на станциях NRGR и NRG2 представлены на рис. 2, 3 для горизонтальных компонент и рис. 4 – для вертикальной компоненты. Для обоих пунктов характерна устойчивая длиннопериодная компонента смещения в юго-восточном направлении, величины вековой скорости которых рассчитаны программой первичной обработки данных и вынесены над соответствующими графиками.

Обработка результатов измерений проводилась по стандартной методике расчетов псевдорасстояний и фазовых измерений для каждых суток [21, 25, 26].

Направленное смещение обоих пунктов за период наблюдений непосредственно связано с геометрией активных разломов (рис. 1), в частности, движения могут быть обусловлены сдвиговыми смещениями по Нижне-Нерюнгринской и Беркакитской системам

разломов. Аналогичными исследованиями на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) в Забайкальском геоблоке и на восточной окраине Амурской плиты установлено направленное смещение пунктов к юго-востоку [11, 17]. Согласно детальным геолого-геофизическим исследованиям [16], это определяется сеймотектоникой зоны сочленения структур Байкальской рифтовой зоны и орогенного поднятия Станового хребта. Векторы смещения юго-восточного направления в южной части блока I были выделены также и по результатам повторных геодезических измерений [20].

Совсем другой ход периодических годовых смещений фиксируется в вертикальных и горизонтальных компонентах (рис. 2–4). Если компоненты направления «север-юг» в обоих пунктах представлены практически синфазными кривыми, то вертикальные и «восток-запад» компоненты в отдельные периоды изменяются противофазно. Хотя это и противоречит динамике длиннопериодных компонент, тем не менее, периодическая компонента вектора смещения в пункте NRG2 представлена азимутом в плоскости, ортогональной вектору смещения пункта NRGR (рис. 2, 3). Такой необычный характер движения векторов

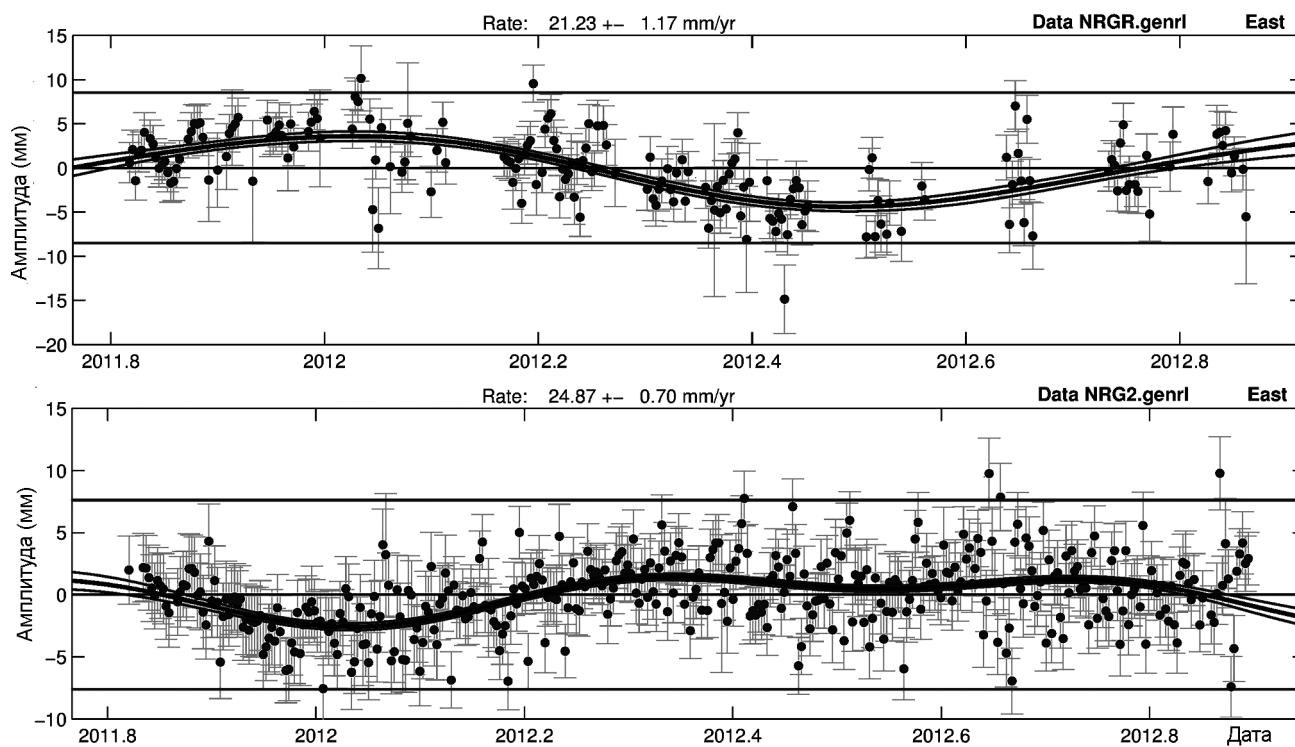


Рис. 3. Динамика компоненты смещения «восток-запад» суточных позиций станций NRGR и NRG2.

Пояснение к рисунку в подрисуночной подписи рис. 2.

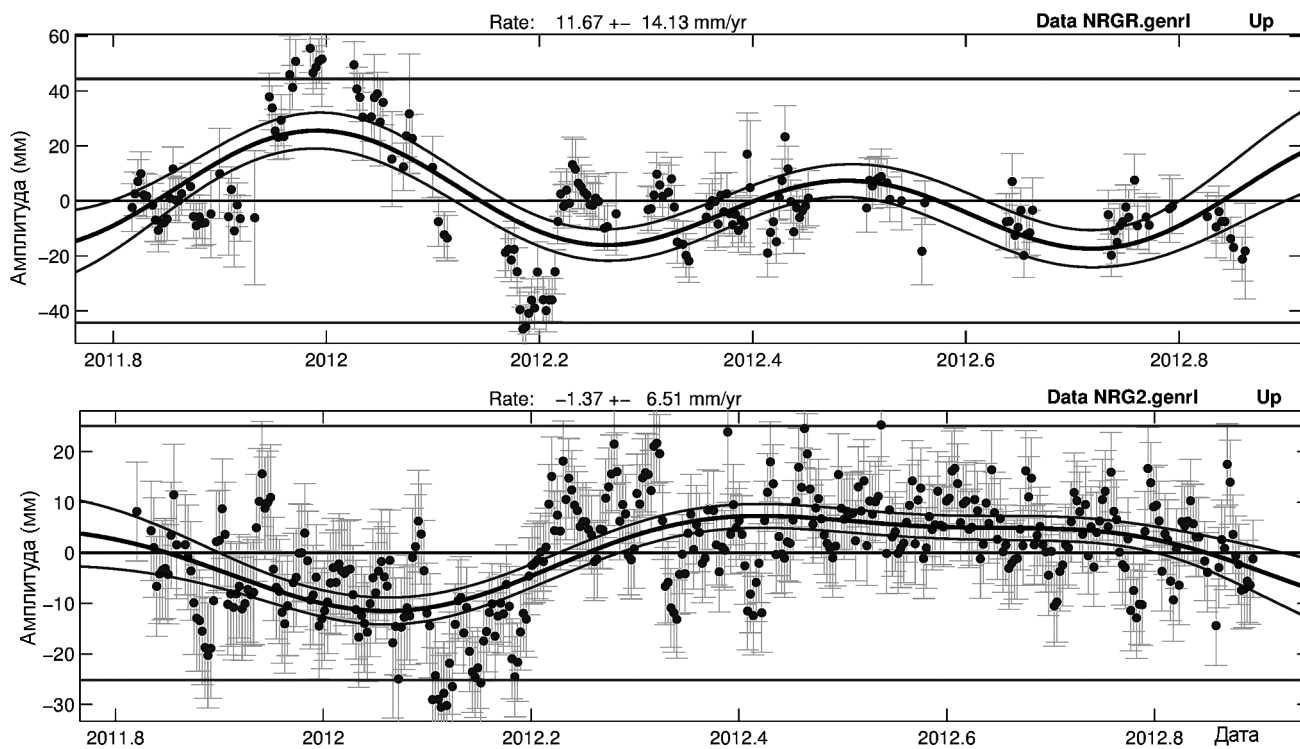


Рис. 4. Динамика вертикальной составляющей смещения суточных позиций станций NRGR и NRG2.

Пояснение к рисунку см. в подрисуночной подписи рис. 2.

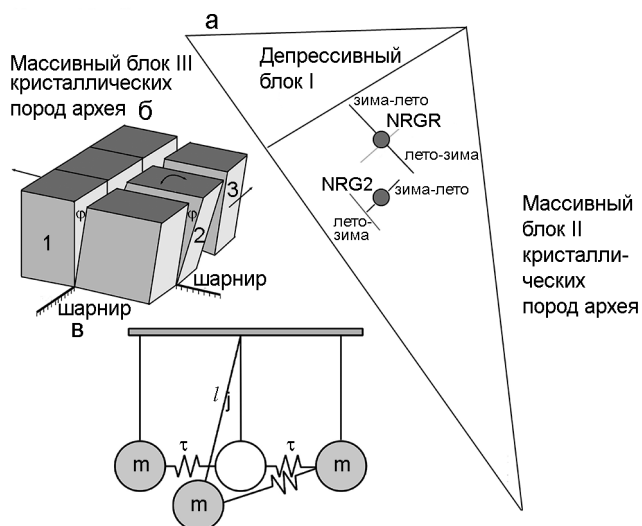


Рис. 5. Иллюстрация движений по разломам «шарнирно-го» типа, см. рис. 1. Пояснения в тексте.

смещения в годичных циклах возможен только в том случае, когда пункты наблюдений прилегают к бортам локальных разломов особого – «шарнирно-го» – типа. Для пункта NRGR «шарниром» является локальный опережающий разлом Суннагино-Ларбинской системы разломов северо-восточного простирания, а для пункта NRG2 – одна из ветвей Беркакитского разлома северо-западного простирания (рис. 1, рис. 5 б). На рис. 5 а границы микроблоков отображены в соответствии с детальной структурно-геологической картой (рис. 1, вставка); на рис. 5 б показаны возможные движения блоков (1 – отклонение, 2 – поворот, 3 – смещение); 5 в – механическая (маятниковая) модель движения блоков.

Изучение типов движений при проведении земноприливных наблюдений показало [18], что «шарниром» может быть трещина шириной 10 см в кристаллическом массиве горных пород. Внешняя нагрузка может вызвать наклон земной поверхности в том случае, если она действует на ослабленную зону вблизи пункта наблюдений. Это, в свою очередь, приводит к подъему или опусканию пункта в зависимости от его расстояния до «шарнира». Геометрия активных разломов позволяет предположить наличие ортогональных систем локальных разломов, которые под действием внешней нагрузки работают в виде «шарниров» блоков. Причем, соотношение амплитуд вертикальных и горизонтальных компонент (рис. 2–4) на обоих пунктах указывает на то, что пункт NRGR расположен в непосредственной близости, а пункт NRG2 – на удалении от своего «шарнира» (рис. 5).

АППРОКСИМАЦИЯ ИСХОДНЫХ КРИВЫХ СМЕЩЕНИЙ ФУНКЦИЯМИ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

В результате статистической обработки массивов первичных данных из суммарного сигнала горизонтального смещения пункта NRGR была выделена циклическая компонента смещения на годичных реализациях [19], представляющая собой «сезонную» волну (рис. 6). Качественный анализ показывает, что компоненту «север-юг» можно аппроксимировать кривой синусоидальной формы. Однако наилучший вариант дает аппроксимация исходной кривой полиномом четвертой степени вида $y = 0.0013x^4 - 0.0375x^3 + 0.3396x^2 - 0.9657x + 0.831$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.9657$. Форму кривой компоненты «восток-запад» принять за косинусоиду можно весьма условно, так как ординаты всех точек нормированной кривой исходных

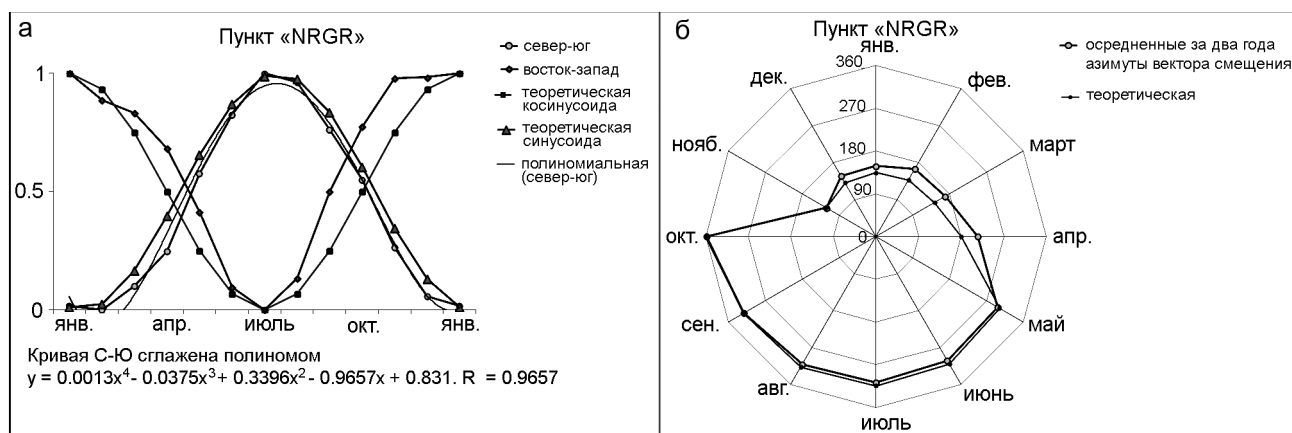


Рис. 6. Циклические составляющие компонент «север-юг» и «восток-запад» смещения пункта NRGR за двухлетний период наблюдений (а) и азимуты горизонтального вектора смещения в течение года (б).

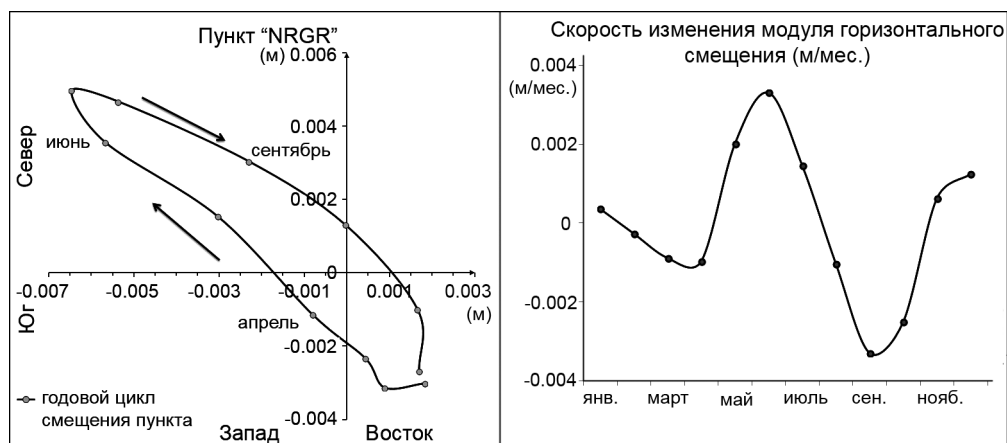


Рис. 7. Динамика смещения пункта измерений в горизонтальной плоскости и скорость изменения модуля горизонтального смещения.

данных превышают значения ординат косинуса. Это же характерно и для компоненты «север-юг». В вычисленных значениях азимутов вектора горизонтального смещения, с нулевым азимутом в направлении «север» и с отсчетом углов по часовой стрелке отсутствуют значения 1-го и 3-го квадрантов, то есть в направлении «северо-восток» и «юго-запад». Распределение векторов горизонтального смещения показывает (рис. 7), что в направлении «северо-восток» пункт движется в течение короткого промежутка времени – с 1 по 15 октября, а в направлении «юго-запад» – с 1 по 15 апреля. При этом в данные периоды скорость смещения пункта минимальна. Максимум скорости смещения достигается в июле и декабре (рис. 7).

Таким образом, формы кривых смещений компонент горизонтального вектора (рис. 6) заметно отличаются от синусоиды. Экспериментальную кривую, описываемую вектором смещений в течение года (рис. 7), наложить на наклонный овал, построенный в координатах «синус-косинус», вообще не представляется возможным, так как нижние ветви сравниваемых кривых имеют разную кривизну. То же самое относится и к форме кривой скорости изменения модуля горизонтального смещения.

Численное моделирование при подборе аппроксимирующей кривой вертикальной компоненты смещения блока привело к замечательному результату. Оказалось, что функция, имеющая наилучшее приближение к экспериментальной кривой, совпадает по форме с бризером – решением уравнения sin-Гордона. При выборе формы теоретической кривой в виде бризера (5) (см. ниже) этот результат для компоненты «север-юг» получается при $\omega = 0.873$ с погрешностью, равной 0.048 (для синуса 0.069), а для компоненты

«восток-запад» – при $\omega = 0.780$ с погрешностью, равной 0.052 (для косинуса 0.149). Формы подобранных кривых представлены на рис. 8.

Взаимосогласованное изменение горизонтальных и вертикальных компонент в период с августа 2011 г. по апрель 2012 г. (рис. 2–4) приводит к задаче о колебании блока в вертикальной плоскости. Совпадение характера измеренных вертикальных смещений с одним из решений канонического уравнения sin-Гордона послужило мотивацией применить это уравнение для разработки нелинейной модели циклических вертикальных компонент движения блоков.

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВ

Анализ результатов наблюдений показывает, что внешние поля инициируют три типа движения блоков в разломных зонах: вращательные и трансляционные движения в горизонтальной плоскости, а также колебания в вертикальной плоскости.

Первые два типа перемещений достаточно хорошо изучены. Вблизи разломов многими исследователями действительно зафиксированы поступательные и вращательные движения, возникающие вследствие тектонических процессов или землетрясений. В специальных монографиях [28, 29] и статьях [27, 30] об этом приведены многочисленные сведения: представлен анализ сейсмограмм, описания волн поворотов блоков геосреды при землетрясениях, специальные приборы для регистрации поворотных волн, а также большое количество эмпирических данных о возникающих при землетрясениях вращательных эффектах: повороты памятников, деформации строительных конструкций, вызванные кручением зданий.

При математическом моделировании динамики разломов, механизмов поворота и скольжения блоков

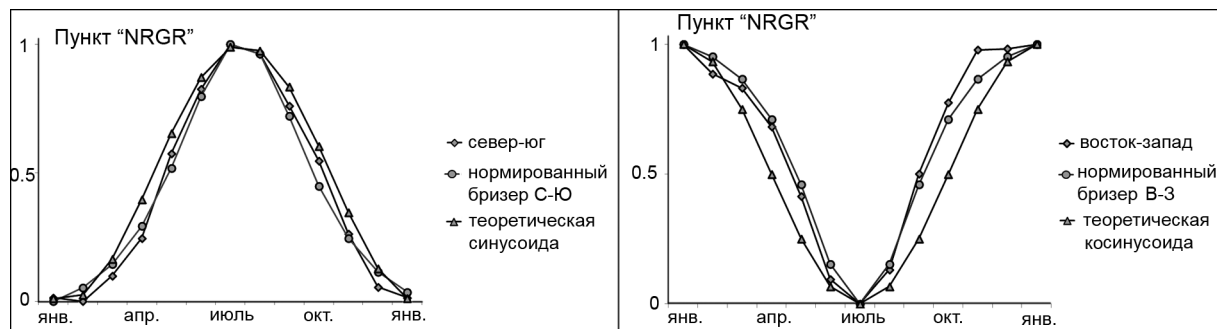


Рис. 8. Результаты подбора формы бризера к экспериментальной кривой.

земной коры, а также интерпретации наблюдаемых при этом деформационных волновых эффектов применяется уравнение \sin -Гордона [2, 4, 5, 13, 14, 22, 24]. Каноническое уравнение \sin -Гордона имеет несколько аналитических решений в виде кинков, бризеров, кноидальных волн и уединенных волн (солитонов). Каждому из решений соответствует свой ход эволюции системы блоков и разломов [3]. Корректность применения уравнения \sin -Гордона к геосредам доказывается тем, что его следствия согласуются с результатами экспериментов, иначе, уравнение обобщает опытные данные.

Третий тип перемещений соответствует другой реальной ситуации, когда поверхности соприкасающихся блоков земной коры имеют квазипериодические вертикальные компоненты колебаний. Если блок с прилегающим разломом «шарнирного» типа (рис. 5 б) представить как маятник (рис. 5 в), то взаимодействие блоков – колебательные движения жестко связанных блоков в вертикальной плоскости – можно моделировать в виде цепочки одинаковых связанных маятников.

Для случая радиальной силы, действующей на i -ый блок и отклоняющей его на угол φ , воспользуемся уравнением движения:

$$I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n M_i$ – сумма моментов сил, действующих в системе блоков. Для системы из трех одновременно взаимодействующих блоков (цепочка связанных маятников) из (1) следует

$$I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -mgl \sin \varphi + \tau d^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $mgl \sin \varphi$ – момент силы тяжести, m – сосредоточенная масса, l – длина стержня (высота блока),

$\tau d^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$ – сумма моментов сил кручения со стороны

соседних блоков, τ – постоянная кручения пружин (жесткость среды), d – приращение (увеличение или уменьшение в зависимости от типа движения) расстояния между блоками, I – момент инерции блока. В обозначениях $\omega^2 = mgl/I$ и $c^2 = \tau d^2/I$ из (2) получим уравнение

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\omega^2 \sin \varphi. \quad (3)$$

При переходе к безразмерным переменным $t' = \omega t$ и $x' = x\omega/c$ уравнение баланса сил (3), действующих при перемещении блоков, преобразуется в каноническое уравнение \sin -Гордона [1, 7]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x'^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t'^2} = \sin \varphi. \quad (4)$$

Одно из возможных решений уравнения (4) называется бризером (динамическим солитоном) и представляет собой нелинейную функцию, которая для случая солитона с неподвижным центром тяжести имеет вид:

$$\varphi(x, t) = 4 \arctg \left[\left(\frac{\sqrt{1 - \omega^2}}{\omega} \right) \frac{\sin(\omega t)}{\operatorname{ch}(x\sqrt{1 - \omega^2})} \right], \quad (5)$$

где ω – внутренняя частота колебаний бризера.

Бризер – пульсирующее во времени и локализованное в пространстве образование. Подобно солитону, он имеет форму импульса и представляет собой стоячую волну сжатия и расширения среды. В пределе низких частот $\omega \ll 1$ бризер можно качественно трактовать как слабо связанную пару кинка и антикинка (решения уравнения \sin -Гордона противоположных знаков в виде топологического солитона – волны с неизменным профилем в виде перегиба) [1].

Раннее решение канонического уравнения \sin -Гордона в виде бризера уже применялось при моделировании волновой динамики разломов и деформационных волн. Так, в [13] рассмотрен сценарий, при котором результатом столкновения двух тектониче-

ских волн является сильное землетрясение. Показано, что столкновение «кинк-антикинк», моделирующее взаимодействие двух крупномасштабных волн, может привести к образованию устойчивой долгоживущей пары, которая излучает энергию и постепенно затухает, и при этом непрерывно генерирует поперечные волны смещений.

Решение в виде бризера было также привлечено при интерпретации особенностей динамики разлома, наблюдаемых после землетрясения Лома-Приета (1989 г.). Здесь афтершоки представляли собой несовместимые типы землетрясений с механизмами правостороннего, левостороннего сдвига, обратного и нормального сброса практически в одном и том же месте. Это необычное явление может быть объяснено с помощью решения бризера, который сформирован при взаимодействии двух дислокаций (модель Френкеля-Конторовой) противоположного знака в определенных условиях [24].

И наконец, на основе модифицированной пружинно-блоковой модели Барриджа-Кнопва получено решение, соответствующее локализованному разрушению – бризеру, который распространяется вдоль разлома и затухает в сегменте разлома конечной длины [23].

Одна из задач настоящего исследования состояла в том, чтобы найти адекватную математическую модель вертикальных колебательных движений блока с траекторией необычного характера. В данном случае аналитическое решение уравнения \sin -Гордона в виде бризера принципиально важно для качественного описания простейших регистрируемых характеристик блока (форма смещения, профиль скорости смещения). Соответствие формы решения уравнения \sin -Гордона (5) и наблюдаемой кривой смещения (рис. 8) дает возможность предположить, что сезонный ход смещений (деформаций земной коры) в зонах активизированных геологических структур представляет собой уединенные деформационные волны. Форма волн для компонент вектора горизонтального смещения отличается и зависит от геометрии активных разломов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Неоднородность в распределении поля скоростей современных вертикальных и горизонтальных движений контрастнее проявляется в зонах активизированных разломов, в которых и расположены пункты GPS-наблюдений NRGR и NGR2.

Обобщение геодезических материалов за 30-летний период изучения деформаций земной поверхности на Южно-Якутском геодинамическом полигоне

показало, что в зоне влияния Беркакитского разлома в период с 1967 по 1972 годы амплитуды вертикальных смещений не превышали 3 мм, а в период с 1972 по 1973 годы – увеличились до 20 мм. В ортогональном направлении Южно-Якутскому надвигу в пределах его зоны динамического влияния выделена градиентная зона смены знака вертикальных смещений. Весь геодинамический полигон вовлечен в поле отрицательных вертикальных смещений со скоростью порядка 5 мм/год [9].

В поле горизонтальных смещений для Чульманского блока характерна разнонаправленность векторов вблизи Беркакитской и Нижне-Нерюнгринской зон разломов со сменой направлений векторов с юго-восточного на северо-западное. Средняя величина модуля векторов в Чульманском блоке находится в пределах от 10 до 30 мм. Весь блок охарактеризован переменным полем напряжений «сжатие-расширение».

В целом юго-восточный дрейф характерен для обоих блоков Алданского щита, обрамляющих Чульманский блок (рис. 1). Современное направление смещения обоих пунктов в данном направлении указывает на то, что пункты NRGR и NGR2, расположенные на одном блоке, вовлечены в общий деформационный процесс, характерный для переходной области сочленения структур Байкальской рифтовой зоны и орогенного поднятия Станового хребта. В этом смысле результаты наблюдений подтверждают данные более ранних геодезических исследований [20] и согласуются с результатами современных геодинамических исследований методами GPS-геодезии [10, 12].

Представленные результаты GPS-измерений показывают, что изменение модуля скорости полного смещения практически совпадает с годичным циклом изменения скорости вращения Земли. Основной вклад в движение Чульманского блока вносит кинематика блока II (рис. 1) как наиболее массивного. Наблюдаемые колебания блока I в направлении «юго-восток» – «северо-запад» обусловлены геометрией Южно-Якутского надвига. Так как движение блока I в годичных циклах нелинейное, то средняя ширина гистерезиса, равная 0.003 м, может накапливаться в виде деформаций. То есть западный блок II надвигается на блок I и взбросо-надвиговая природа Южно-Якутского разлома может быть частично сформирована инерционным взаимодействием блоков.

По длиннопериодной компоненте установлено взаимное соответствие смещения на двух пунктах как по амплитуде, так и по азимуту. Юго-восточный дрейф блока, где расположены пункты GPS-наблюдений, соответствует основному азимуту простирания систем активизированных разломов.

Сезонный ход смещений – деформаций земной коры, – регистрируемый в зонах активизированных геологических структур, представляет собой волновой процесс. Причем, форма волн для компонент вектора горизонтального смещения отличается и зависит от геометрии активных разломов.

Результаты наблюдений в двух пунктах показывают, что деформации земной поверхности могут представлять собой сумму отклонений различных порядков и периодов, вызванных переменными нагрузками, например, экзогенного, эндогенного или космического происхождения.

По периодическим компонентам полного вектора смещения установлены движения шарнирного типа по локальным разломам. По форме траектории горизонтального вектора смещения показано, что в годичных циклах колебательные движения соответствуют нелинейной модели связанных блоков – каноническому уравнению \sin -Гордона, а в зонах активизированных разломов возможно формирование уединенных деформационных волн.

Авторы благодарны сотрудникам Института земной коры СО РАН С.В. Ашуркову, В.А. Санькову и А.В. Санькову за сотрудничество в организации GPS наблюдений и первичную обработку полученных данных. Авторы признательны А.В. Викулину и М.Д. Герасименко за полезные советы и конструктивные замечания, сделанные при чтении рукописи статьи.

Работа выполнена в рамках проекта «Волновая динамика медленных деформационных процессов, активные тектонические структуры на Востоке Азии» по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН П 4 (грант ДВО РАН 12-И-П4-07).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браун О., Кившарь Ю. Модель Френкеля-Конторовой: Концепции, методы, приложения. М.: Физматлит, 2008. 519 с.
2. Быков В.Г. Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 1. С. 104–108.
3. Быков В.Г. Нелинейные геологические процессы в геологических средах. Владивосток: Дальнаука, 2000. 190 с.
4. Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 6. С. 559–570.
5. Гарагаш И.А. Микродеформации предварительно напряженной дискретной геофизической среды // Докл. РАН. 1996. Т. 347, № 1. С. 95–98.
6. Геодинамика Олекмо-Становой сейсмической зоны / Л.М. Парфенов, Б.М. Козьмин, В.С. Имаев и др. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. 136 с.
7. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988. 694 с.
8. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 226 с.
9. Имаев В.С., Трофименко С.В., Гриб Н.Н. и др. Разломная тектоника и геодинамика в моделях очаговых зон сильных землетрясений Южной Якутии. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 274 с.
10. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.
11. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Новые данные о современных тектонических деформациях южного горного обрамления Сибирской платформы // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 1. С. 100–103.
12. Мирошниченко А.И., Сорокин А.П., Саньков В.А. др. Космическая геодезия в задачах геодинамики: современные движения в Зейско-Буреинском бассейне // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 71–79.
13. Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Тектонические волны ротационного типа с излучением сейсмических сигналов // Физика Земли. 2000. № 11. С. 3–10.
14. Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 3. С. 403–405.
15. Овсяченко А.Н., Трофименко С.В., Мараханов А.В. и др. Детальные геолого-геофизические исследования зон активных разломов и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 4. С. 55–74.
16. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Трофименко С.В. и др. Сейсмоструктура зоны сочленения структур Байкальской рифтовой зоны и орогенного поднятия Станового хребта // Геофиз. исслед. 2007. № 8. С. 81–116.
17. Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 165–179.
18. Трофименко С.В., Широков И.А., Анохина К.М. Результаты земноприливных наблюдений на территории Южной Якутии // Геофизические исследования в Якутии. Якутск: Изд-во ЯГУ, 1995. С. 55–63.
19. Трофименко С.В. Годичная динамика движения GPS-пункта «Нерюнгри» // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы всерос. совещ. и молодежной школы по современной геодинамике. Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 2012. Т. 2. С. 189–192.
20. Фотиади Э.З., Есиков Н.П., Бочаров Г.В. и др. Тектонофизическое районирование зоны сочленения Алданского щита и Станового нагорья по данным плановых геодезических измерений // Геология и геофизика. 1982. № 3. С. 3–15.
21. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L., ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame // Journ. Geodesy. 2011. V. 85. P. 457–473. doi:10.1007/s00190-011-0444-4.
22. Bykov V.G. Stick-slip and strain waves in the physics of earthquake rupture: experiments and models // Acta Geophysica. 2008. V. 56. P. 270–285.
23. Erickson B.A., Birnir B., Lavallee D. Periodicity, chaos and localization in a Burridge–Knopoff model of an earthquake with rate-and-state friction // Geophys. J. Int. 2011. V. 187. P. 178–198.
24. Gershenzon N.I., Bykov V.G., Bambakidis G. Strain waves, earthquakes, slow earthquakes, and afterslip in the framework

- of the Frenkel-Kontorova model // Physical Rev. E. 2009. V. 79, N 5. 056601.
25. Herring T.A, King R.W., McClusky S.C. Reference manual GAMIT. GPS analysis at MIT release 10.4, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2010. http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref_10.4.pdf.
 26. Herring T.A, King R.W., McClusky S.C. GLOBK reference manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program release 10.4, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2010. http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK_Ref_10.3.pdf
 27. Lee W.H.K., Celebi M., Todorovska M.I., Igel H. (eds.). Supplement. Rotational seismology and engineering applications // Bull. Seism. Soc. Amer. Spec. Issue. 2009. V. 99. 1486 p.
 28. Teisseyre R., Takeo M., Majewski E. (eds). Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Springer Verlag, Berlin, 2006. 582 p.
 29. Teisseyre R., Nagahama H., Majewski E. (eds.). Physics of asymmetric continuum: Extreme and fracture processes// Earthquake Rotation and soliton waves. Springer, Berlin-Heidelberg, 2008. 293 p.
 30. Vikulin A.V., Tveritina T.Yu., Ivanchin A.G. Wave moment geodynamics // Acta Geophysica. 2013. V. 61, N 2. P. 245–263.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

S.V. Trofimenko, V. G. Bykov

The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data

Results of the analysis of the crustal block movement obtained from GPS data in the South Yakutia geodynamic testing area, located at the junction of two major tectonic structures, namely, the Aldan Shield of the Siberian Platform and the Stanovoy fold-block area, are shown. The drift of the block in the southeastern direction corresponds to the main azimuth of the strike of the activated fault systems and is consistent with the results of geodetic measurements carried out in the 70s and 80s of the 20th century. Based on periodic components of the complete displacement vector, the hinge-type movements along faults are established. It is shown that in the annual cycles the rotational, oscillational and translational movements of the block are of nonlinear character, and the formation of strain solitary waves is possible in the zones of activated faults.

Key words: recent geodynamics, GPS data, block movement, nonlinear model, the Aldan Shield, South Yakutia testing, South Yakutia testing area.