

УДК 528.02:550.348.436 (5)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-31-39>

О геодезических спутниковых измерениях в центре Азии в эпоху современных землетрясений

В. Ю. Тимофеев¹✉, Д. Г. Ардюков¹, А. В. Тимофеев¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Измерения методами ГНСС активно проводятся в последние десятилетия по всему земному шару. Одной из задач таких исследований является поиск предвестников и оценка последствий землетрясений. Исследование смещений и деформаций на северной границе зоны активных деформаций Азии и связанной с ними сейсмичности проводится с использованием локальных и международных ГНСС-сетей. В результате анализа установлено, что скорость смещений широтной координаты изменяется с юга на север от Индии до Сибирских платформ, от 50 мм/год до нуля. Деформирование южной части Азии вызывает сильные землетрясения в регионе. Установлено, что на северной границе зоны замедления смещений в эпоху 1989–2024 гг. произошло 7 сильных землетрясений магнитудой больше 6,5, которые сопровождаются современными движениями земной поверхности. Так, при Чуйском землетрясении 2003 г. ($M = 7,5$) в Горном Алтае косейсмические смещения (величиной от 1 до 0,01 м) зарегистрированы в 100-километровой эпицентральной зоне. В асейсмический период пункт Усть-Кан (USTK, эпоха 2000–2024 гг.), расположенный в западной части Горного Алтая, движется на север со скоростью 0,5 мм/год, что соответствует установленной ранее средней скорости для Горного Алтая 0,8 мм/год. В асейсмический период пункт POL2 в Тянь-Шане (полигон под г. Бишкек, Киргизская Республика) смещается относительно северных платформ со скоростью 3,0 мм/год. На территории западной Монголии происходит поворот горизонтальных движений с северного на юго-восточное (со скоростью от 0,8 до 5 мм/год), что приводит к накоплению деформаций в земной коре и землетрясениям. Годовая скорость накопления деформации в сейсмоактивных районах на порядок выше скорости на Сибирских платформах.

Ключевые слова: ГНСС-технологии, смещения и деформации при землетрясениях, предсказания землетрясений, тектоника плит, Азия

Для цитирования:

Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В. О геодезических спутниковых измерениях в центре Азии в эпоху современных землетрясений. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 1. С. 31–39. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-31-39>

Geodetic satellite observations of modern earthquakes in Central Asia

V. Yu. Timofeev¹✉, D. G. Ardyukov¹, A. V. Timofeev¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Abstract. GNSS measurements have been conducted worldwide over recent decades. A primary objective is identifying earthquake precursors and assessing postseismic effects. Studies of displacements and deformations along the northern margin of Asia's active deformation zone and associated seismicity employ local and international GNSS networks. Velocities of latitudinal displacement decrease northward from India to the Siberian cratons, from ~ 50 mm/year to near zero. Southern Asian deformation drives major regional earthquakes. Along this northern deceleration boundary, seven strong events ($M > 6.5$) occurred from 1989 to 2024, each accompanied by measurable surface deformation. For example, the 2003 Chuya earthquake ($M 7.5$) in Gorny Altai produced coseismic displacements of 0.01–1 m within a 100 km epicentral zone. In intervening aseismic periods, the Ust-Kan GNSS station (USTK; 2000–2024) in western Gorny Altai moves northward at 0.5 mm/year, aligning with the regional average of 0.8 mm/year. Similarly, station POL2 in the Tien Shan (near Bishkek, Kyrgyzstan) displaces relative to northern cratons at 3.0 mm/year. In western Mongolia, horizontal velocities rotate from northward to south-eastward (0.8–5 mm/year), promoting crustal strain buildup and seismicity. Annual strain rates in active zones exceed those on the Siberian cratons by an order of magnitude.

Keywords: GNSS technology, displacements and deformations, earthquakes, plate tectonics, Asia

For citation:

Timofeev V. Yu., Ardyukov D. G., Timofeev A. V. (2026). Geodetic satellite observations of modern earthquakes in Central Asia. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGIT]* Vol. 31, No. 1. pp. 31–39. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-31-39>

Введение

Появление ГНСС-технологий позволяет определять величину современных смещений земной поверхности, связанных с сейсмичностью. Причиной появления сильных сейсмических событий в южной части Азии является известное из геологии столкновение Индийской плиты с Евразийской [1]. Давление Индийской плиты продолжает деформировать южную часть Азии, порождая катастрофические землетрясения магнитудой более 8 (Гоби-Алтайское 1957 г. в Монголии; Кунь-Луньское 2001 г. в Китае; землетрясение 2025 г. в Мьянме). Активная сейсмичность южной части Азии распространяется до границы с асейсмичными Сибирскими платформами на севере. На карте (рис. 1) показаны сильные землетрясения магнитудой $M > 6,5$, зарегистрированные на северной границе активных деформаций Азии за последние 35 лет [2]. Показано положение эпицентров землетрясений: 22.04.1989, Южно-Якутского, координаты $57,5^{\circ}\text{N}$, $122,1^{\circ}\text{E}$, $M = 6,9$; 14.06.1990, Зайсанского, $48,0^{\circ}\text{N}$, $85,1^{\circ}\text{E}$, $M = 7,1$; 27.12.1991, Хубсугульского, $51,1^{\circ}\text{N}$, $98,1^{\circ}\text{E}$, $M = 6,9$; 19.08.1992, Суусамырского, $42,14^{\circ}\text{N}$, $73,57^{\circ}\text{E}$, $M = 7,3$; 27.09.2003, Чуйского, $49,89^{\circ}\text{N}$, $87,81^{\circ}\text{E}$, $M = 7,5$; 12.01.2021, Хубсугульского, $51,1^{\circ}\text{N}$, $98,1^{\circ}\text{E}$, $M = 6,8$; 22.01.2024, землетрясения на границе КНР

и Киргизии, $41,6^{\circ}\text{N}$, $79,0^{\circ}\text{E}$, $M = 7$. Точки и треугольники на карте – это сетевые GPS-пункты. Отмечены станции в Новосибирске, Красноярске, Иркутске, Улан-Удэ, Улан-Баторе, Урумчи. На отдельных участках этой территории с начала 1990-х гг. проводятся измерения по технологии ГНСС и регистрируются деформации, разрывы и разрушения на земной поверхности [3–7].

Задачей работы является (используя ГНСС-технологии поиск предвестников) выделение значительных смещений и деформаций при землетрясениях в эпоху 1989–2024 гг. в центральной части Азии (см. рис. 1).

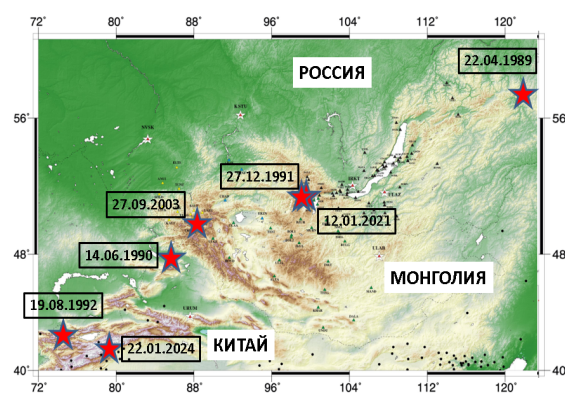


Рис. 1. Положение эпицентров сильных землетрясений ($M > 6,5$), случившихся за последние 35 лет на северной границе зоны активных деформаций Азии

Методы измерений

Широкое распространение с середины 1990-х гг. прошлого столетия получили Глобальная система позиционирования (GPS), ГЛОНАСС и другие спутниковые системы, что позволило производить измерения координат с высокой точностью, используя двухчастотные геодезические приемники и специальные антенны. С учетом поправок, в итоге была достигнута точность измерения длин линий 1–2 мм, что позволило использовать метод в исследованиях современных сейсмических процессов. При измерениях на отдельном пункте сети накопленные за трое и более суток значения координат обрабатываются с использованием специальных программных пакетов, например, GAMIT-GLOBK [8]. В обработку берутся данные, полученные на локальной сети, и

данные до 40 GPS-станций международной сети IGS с поправками [3]. Определение координат проводится в геоцентрической системе координат относительно центра масс Земли. Координаты определяются либо в значениях по осям X, Y, Z относительно центра масс Земли, либо в географических координатах, а высота – относительно эллипсоида WGS-84. Пример определения координат пункта POL2 – научный полигон в 30 км от г. Бишкек (Тянь-Шань, Киргизская Республика) – приведен в таблице. Точность определения координат по ежедневным сериям составляет 2–3 мм, для среднего по данным многодневных измерений от 0,5 до 0,9 мм. По ежедневным сериям получили отклонение для высот 6–7 мм, а для среднего значения по многодневным сериям среднеквадратичную ошибку 1,6 мм.

Результаты ежедневного определения координат для эпохи «июль 2023 г.». Постоянный GPS пункт POL2 (Тянь-Шань, Киргизская Республика) сети IGS

День, месяц, год	Широта, °	Отклонение, мм	Долгота, °	Откл., мм	Высота, м	Откл., мм
21.07.2023	42,6797708424	2,15	74,6942713525	3,45	1714,213	6,23
22.07.2023	42,6797708336	2,15	74,6942713301	3,44	1714,208	6,94
23.07.2023	42,6797708499	2,13	74,6942713898	3,33	1714,211	6,84
Среднее	42,6797708420	0,5	74,6942713575	0,9	1714,2107	1,6

Получив многолетние изменения координат, определяем скорости смещений пунктов земной поверхности. В значениях горизонтальной скорости надо исключить плитное смещение на сфере, определяемое по соотношениям Эйлера. Известны несколько кинематических моделей вращения плит с различными параметрами. Исторически в 1994 г. была создана модель NUVEL-1A из 15 тектонических плит [9], далее в 2008 г. – модель NNR-MORVEL56 – из 56 плит [10, 11]. В настоящее время сложности точного определения кинематики отдельных плит привели в 2016 г. к модели из 11 плит [12]. Ошибка модели для горизонтальных компонент составляет 0,2 мм.

Данные измерений и обсуждение результатов

Изменения смещений. С использованием ГНСС-технологий появились научные проекты и первые результаты определения смещений пунктов земной поверхности для Евразии и окружающих ее тектонических плит [4]. На рис. 2 приведена сводная картина смещений с ошибками, полученная с 1994 по 2002 г. для находящегося в центре Азии Центрально-Азиатского складчатого пояса (результаты по нашему проекту INTAS 97-30874); звездочкой отмечены сильные землетрясения ($M > 6,5$) на северной границе зоны активных деформаций Азии – Центрально-Азиатского складчатого пояса за период

1989–2024 гг. Плитное смещение для Евразии определялось в системе ITRF-2000 с модельными координатами полюса Эйлера: $52,266^\circ\text{N}$; $-107,022^\circ\text{E}$ и угловой скоростью $0,245^\circ/\text{млн лет}$ (рис. 2).

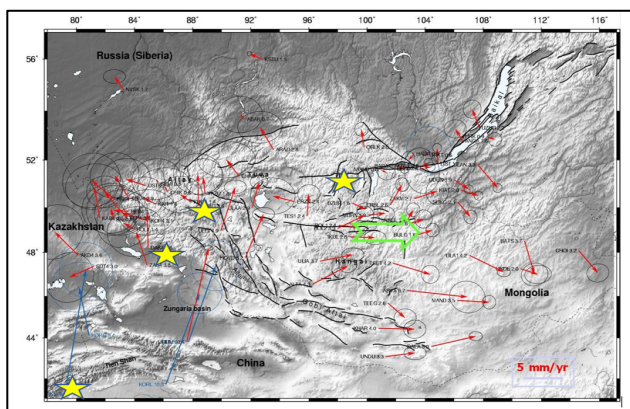


Рис. 2. Поле горизонтальных скоростей для Центральной Азии, смещения относительно северных станций Евразии

Из анализа смещений пунктов следует отметить движение Индии на ССВ со скоростью до 50 мм/год [4]. Далее в направлении на север происходит постепенное уменьшение скорости. На границе зоны активных деформаций (Тянь-Шань, Алтай, Саяны, Байкал) происходит изменение направления смещений, выделяются значимые скорости смещений ($3\text{--}15\text{ мм}$ в год) относительно расположенных севернее стабильных Сибирских платформ (постоянные пункты NVSK – Новосибирск; KSTU – Красноярск; IRKT – Иркутск). В центре Азии происходит изменение смещений с северного направления на восточное, юго-восточное от области сжатия (молодые горные системы) к области растяжения (Байкальский рифт). Сильные землетрясения, показанные на рис. 1, случились в зонах сжатия (Тянь-Шань – Алтай) и зонах сдвига, расположенных на флангах Байкальской рифтовой системы. В области растяжения (впадина озера Байкал) сильных событий с магнитудой около 7 не отмечено. В настоящее время относительно хорошо изученными оказались районы Тянь-Шаня, Алтая – Саян и Байкальский регион, включая Забайкалье [4, 6]. Удалось провести определения смещений в эпохи современных землетрясений. Так, например, для Чуйского землетрясения зарегистрированы особенности распределения смещений в эпоху подготовки землетрясения, в мо-

мент землетрясения и постсейсмический период [13]. Косейсмические подвижки для события магнитудой 7,5 изменяются от 1 м на 80-километровом сейсмическом разрыве до $0,01\text{ м}$ на расстоянии 100 км от разлома. Пространственное распределение смещений в рамках вязкоупругих моделей позволило уточнить параметры земной коры Алтая [13].

Рассмотрим эпоху 2023–2024 гг. Наиболее близким к эпицентру события 22.01.2024 на границе Китая и Киргизской Республики (координаты $41,256^\circ\text{N}$, $78,654^\circ\text{E}$, глубина 13 км , магнитуда $M = 7,0$) пунктом Алтайской сети оказался пункт на сейсмостанции «Усть-Кан» (USTK, координаты $50,939^\circ\text{N}$; $84,769^\circ\text{E}$, высота $1\,004\text{ м}$). Смещение пункта USTK за период 2000–2024 гг. с ошибками показано на рис. 3. Для вычислений использованы данные постоянных станций сети IGS. Как представлено на рис. 3, в эпоху 2023–2024 гг. скорости смещений соответствуют многолетним определениям, а эффектов, превышающих ошибку измерений, не наблюдается. Плитное движение пункта определялось по модели Евразии с координатами полюса Эйлера: $54,06^\circ\text{N}$; $-98,97^\circ\text{E}$ и скоростью вращения $0,2492^\circ/\text{млн лет}$. Модельная скорость (в системе ITRF-2014) составляет $-1,068$ и $26,932\text{ мм/год}$.

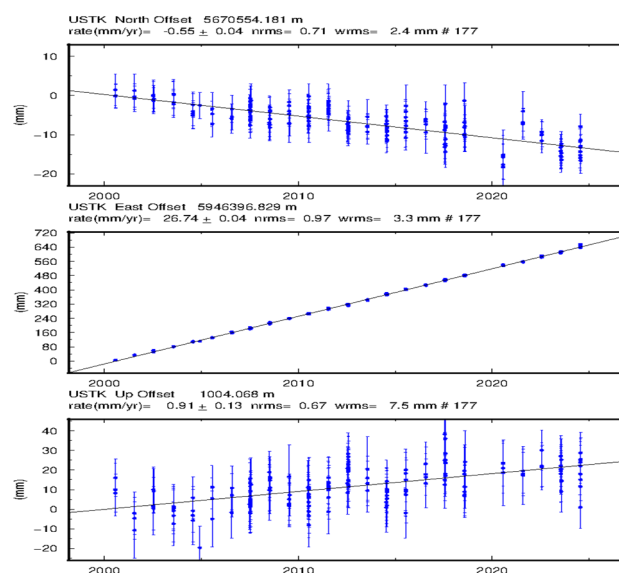


Рис. 3. Смещение пункта «Усть-Кан» (USTK) с 2000 по 2024 г. по ежесуточным летним определениям с ошибкой, сверху вниз: на юг, на восток и по высоте. Смещения в миллиметрах в геоцентрической системе

Разность с экспериментом за период 2000–2024 гг. (см. рис. 3) достигает +0,518 мм/год на север и –0,192 мм/год на запад. Полученные результаты хорошо совпадают с данными по группе из 7 пунктов Горного Алтая по Алтайской сети [13], не затронутой косейсмическими и постсейсмическими изменениями, за период наблюдений с 2000 по 2022 г., скорость горизонтальных смещений составила $+0,8 \pm 0,3$ мм/год на север, $-0,1 \pm 0,5$ мм/год на запад.

Рассмотрим изменения координат для пункта POL2 (координаты 42,679 °N; 74,694 °E, высота 1 714 м), расположенного в 350 км к западу от эпицентра землетрясения 22.01.2024. Вычисления проводились по той же схеме, как и для пункта «Усть-Кан» (см. рис. 3, табл. 1). Для эпохи 2000–2024 гг. получены значения смещений 4,83 мм/год на север и 27,08 мм/год на восток. Значимых эффектов, отличных от среднегодовых скоростей, в эпоху 2023–2024 гг. не от-

мечено. Модельные скорости (система ITRF-2014) для пункта POL2 получаются следующие: 1,80 мм/год на север и 27,65 мм/год на восток. Аномальное смещение составляет +3,0 мм/год на север и –0,5 мм/год на запад. Многолетние изменения высоты достигали + 0,42 мм/год.

Рассмотрим скорость горизонтальных смещений на север на юге Азии для эпохи 2023–2024 гг. отдельно по дням, например, для 197-го и для 198-го дней каждого года. На рис. 4 и 5 показано полученное распределение скорости для территории от 20 до 56 °N градусов по широте и от 36 до 106 °E по долготе. Определение проводилось относительно станции «Новосибирск» (NVSK). Даже в пределах ошибки ежедневных определений картина распределения смещений сохраняется изо дня в день. Оказалось, что землетрясение 22.01.2024 расположено на границе интенсивных смещений на север (см. рис. 4, 5).

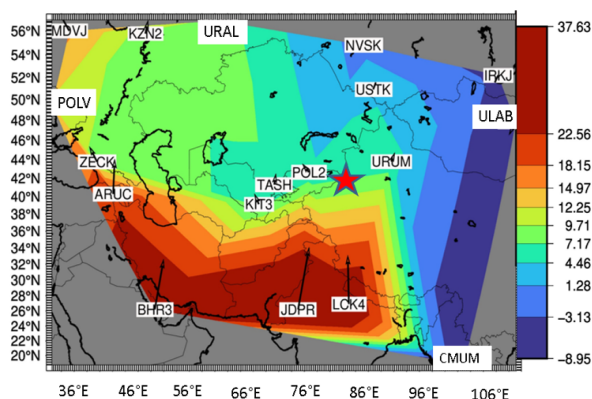


Рис. 4. Распределение смещений на север (мм) относительно пункта Новосибирск для 197-го дня 2024 г. относительно 197-го дня 2023 г. Звездочкой отмечено положение землетрясения 22.01.2024

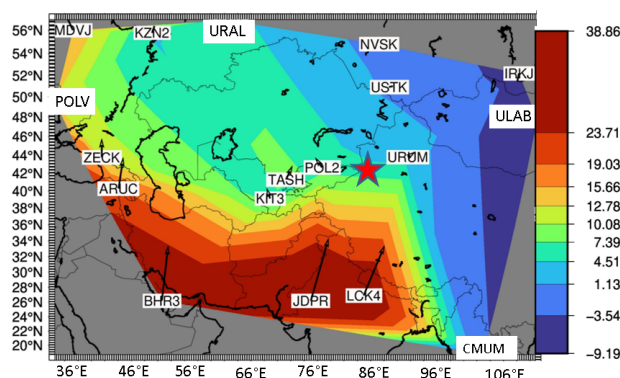


Рис. 5. Распределение смещений на север (мм) относительно пункта «Новосибирск» для 198-го дня 2024 г. относительно 198-го дня 2023 г.

Измерение деформаций. Имея данные о скорости смещения пунктов, можно определять скорость деформации. Область измерений разбивается на треугольники и далее используется метод триангуляции Делоне [14]. Определение скорости объемной деформации для северного полушария рассматривалось в работах [15–17]. Для платформенных областей Сибири, простирающихся от гор Алтая и Саян до Северного Ледовитого океана, получено слабое сжатие со скоростью $1 \cdot 10^{-9}$ в год. Для горных областей известны результаты определений косейсмической деформации в эпицентральной зоне радиусом в 100 км Чуйского землетрясения 2003 г. В эпоху 2003–2004 гг. здесь отмечено растяжение величиной $6 \cdot 10^{-6}$ и сдвиг $4 \cdot 10^{-6}$, ориентация главных осей и направление сдвига лежит в пределах от 116 до 129 °N, что близко к ориентации плоскости сейсмического разрыва длиной 80 км, выходящего на земную поверхность [13]. Скорость деформации по данным постоянных станций Центральной Азии в эпоху 2000–2010 гг. приведена на рис. 6.

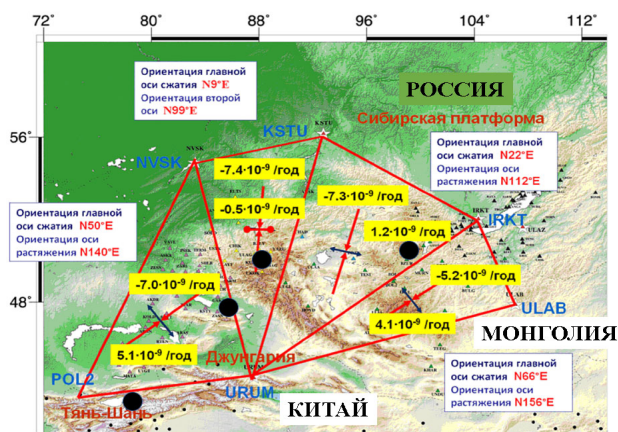


Рис. 6. Скорости деформирования для Центральной Азии по данным GPS-измерений на постоянных станциях сети IGS (2000–2010 гг.): черные точки – эпицентры сильных землетрясений

С запада и с востока территории выделяются области сдвига, в центральной части расположены области сжатия и ограниченного сжатия. Средняя скорость деформации для треугольников составляет от $5 \cdot 10^{-9}$ в год и выше, т. е. в несколько раз превышает сред-

нюю скорость $1 \cdot 10^{-9}$ в год на равнинах, расположенных севернее.

Для эпохи 2023–2024 гг., используя данные постоянных станций международной сети и данные по алтайскому пункту USTK, проведено определение изменений компонент деформаций. Вариации объемной деформации для 197-го и 198-го дней за год представлены на рис. 7, 8.

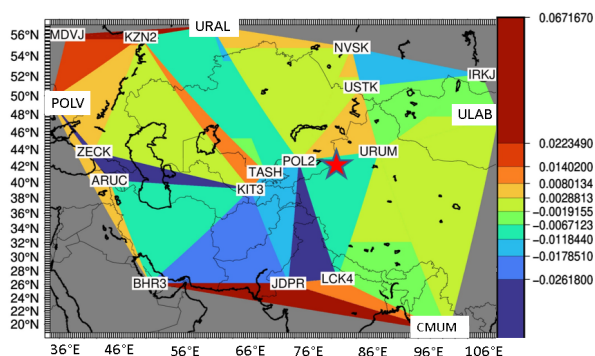


Рис. 7. Изменение объемной деформации 2024 г. относительно 2023 г. на 197-й день. Цветная шкала – дилатация в долях деформации 10^{-6} , т. е. от $+2,23 \cdot 10^{-8}$ до $-2,61 \cdot 10^{-8}$. Положение землетрясения 22.01.2024 отмечено звездочкой

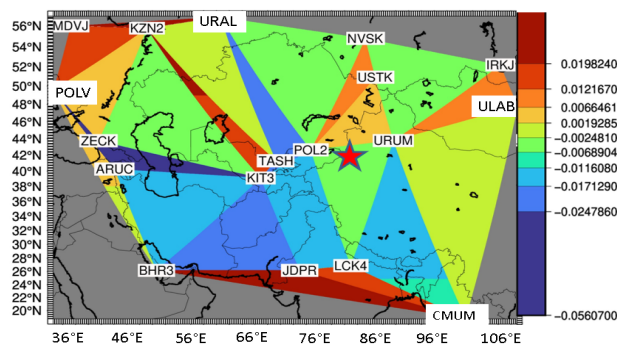


Рис. 8. Изменение объемной деформации 2024 г. относительно 2023 г. на 198-й день. Цветная шкала – дилатация от $+1,98 \cdot 10^{-8}$ до $-2,47 \cdot 10^{-8}$

Анализ показывает отсутствие стабильной картины, вариации отражают изменение величины деформации в присутствии значимой ошибки. К сожалению, такие же особенности наблюдаются и по всей гамме различных компонент деформации, что отражает возможно-

сти сети (расстояния между пунктами от сотен до тысячи километров). Отметим, что эпицентр землетрясения 22.01.2024 попадает на границу изменения значения объемной деформации.

Заключение

В результате анализа данных ГНСС-измерений по локальным и международным сетям получено распределение горизонтальных смещений для южной части Азии. Скорость современных движений изменяется с юга на север Азии от Индии до Сибирских платформ, от 40–50 мм/год до нуля. Закономерно изменяется северная компонента горизонтальных смещений. Установлено, что на северной границе зоны замедления движений (от Тянь-Шаня до Байкала) в эпоху 1989–2024 гг. произошло 7 сильных землетрясений магнитудой больше 6,5. Значимые косейсмические разрывы и смещения земной поверхности регистрируются в 100 км эпицентральной зоны, Косейсмические деформации в этой зоне составляют $4 \cdot 10^{-6}$ – $6 \cdot 10^{-6}$. При расстояниях между пунктами сети более 100 км точности измерений не хватает для определения вариаций смещений при земле-

трясениях магнитудой 7. Пункт «Усть-Кан» (USTK, эпоха 2000–2024 гг.), расположенный в западной части Горного Алтая, смещается на север со скоростью 0,5 мм/год, что соответствует установленной ранее средней скорости для Горного Алтая 0,8 мм/год. Пункт POL2 (Тянь-Шань) смещается относительно северных платформ Азии со скоростью 3,0 мм/год (2000–2024 гг.). Регистрируемая скорость современной объемной деформации в сейсмоактивных горных районах составляет 10^{-7} /год– 10^{-8} /год, что на порядок больше скорости на платформах Сибири 10^{-9} /год. Установлено, что на северной границе области активных деформаций Азии в западной Монголии происходит поворот направления смещений с северного на юго-восточное (скорость от 0,8 до 5 мм/год), что приводит к накоплению деформаций и землетрясениям. Признаком подготовки землетрясения является изменение скорости смещений в будущей эпицентральной зоне [13, 18].

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0019.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Molnar P., Tapponnier P., The Collision between India and Eurasia. Scientific American. 1977. Vol. 236. № 4. P. 30–41.
2. Сеть USGS [Electronic resource]. URL: <https://earthquake.usgs.gov>.
3. Сеть IGS [Electronic resource]. URL: <https://network.igs.org/>.
4. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., San'kov V., Likhnev A., Amariargal S. Are post-seismic effects of the M = 8.4 Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area? Geophys. J. Int. 2002. 149. P. 157–168.
5. Karpik A. P., Kosarev N. S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Y. Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurements. Geodesy and Cartography. 2018. Vol. 44. No. 4. Pp. 140–145.
6. Sankov V. A., Likhnev A. V., Miroshnichenko A. I., Dobrynina A. A., Ashurkov S. V., Byzov L. M., Dembelov M. G., Calais E., Déverchère J. Contemporary Horizontal Movements and Seismicity of the South Baikal Basin (Baikal Rift System). Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2014. Vol. 50 (6). P. 785–794.
7. Вдовин В. С., Дворкин В. В., Карпик А. П., Липатников Л. А., Сорокин С. Д., Стеблов Г. М. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интерпретации в ITRF. Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 1. С. 6–27.
8. Herring, T. A., R. W. King, and McClusky S. C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology. 2010. Cambridge. Massachusetts.
9. Argus D. F., Gordon R. G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. Geophysical research letters. 1991. Vol. 18. № 11. Pp. 2039–2042.

10. Altamimi, Z., Métivier, L. & Collilieux, X. ITRF2008 plate motion model. *J. geophys. Res.* 2012. 117. DOI 10.1029/2011JB008930.
11. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., and Collilieux, X., ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2016. Vol. 121. Pp. 6109–6131. DOI 10.1002/2016JB013098.
12. Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., and Collilieux, X., ITRF2014 plate motion model. *Geophys. J. Int.* 2017. Vol. 209. № 3. Pp. 1906–1912. DOI 10.1093/gji/ggx136.
13. В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев. Вариации полей смещений и сейсмический режим Горного Алтая. *Вулканология и сейсмология.* 2024. № 4. С. 53–68.
14. Burgette R., McClusky S. C., Lejeune S., Watson C. S., McQueen H. A decade of horizontal deformation from great earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2013. № 118. Pp. 2371–2381. DOI 10.1002/jgrb.50154.
15. Мельник Г. Э., Стеблов Г. М. Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии. *Физика Земли.* 2024. № 2. С. 3–15.
16. Ашурков С. В. Деформация южной части Сибирской платформы по данным GPS измерений. *Геодинамика и тектонофизика.* 2022. Т. 13. № 1. DOI 10.5800/GT-2022-13-1-0628.
17. Тимофеев В. Ю., Тимофеев А. В., Семибаламут В. М. Измерение деформаций в Байкальском и Алтайском регионах. «*Геофизические технологии*». 2022. № 3. С. 34–48.
18. Тимофеев В. Ю., Тимофеев А. В., Ардюков Д. Г., Сизиков И. С., Носов Д. А. Измерение современных движений на станции Талая (юго-западная часть Байкальского рифта). *Вестник СГУГиТ.* 2023. Т. 28, № 4. С. 59–70.

REFERENCES

1. Molnar P., Tapponnier P. (1977), The Collision between India and Eurasia. *Scientific American.* Vol. 236. No. 4. P. 30–41.
2. USGS. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov>.
3. IGS. Retrieved from <https://network.igs.org/>.
4. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., San'kov V., Likhnev A., Amariargal S. (2002) Are post-seismic effects of the M = 8.4 Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area? *Geophys. J. Int.* 149. 157–168.
5. Karpik A. P., Kosarev N. S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Y. (2018). Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurements. *Geodesy and Cartography.* Vol. 44. No. 4. Pp. 140–145.
6. Sankov V. A., Likhnev A. V., Miroshnichenko A. I., Dobrynina A. A., Ashurkov S. V., Byzov L. M., Dembelov M. G., Calais E., Déverchère J. (2014). Contemporary Horizontal Movements and Seismicity of the South Baikal Basin (Baikal Rift System). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* Vol. 50 (6). P. 785–794.
7. V. S. Vdovin, V. V. Dvorkin, A. P. Karpik, L. A. Lipatnikov, S. D. Sorokin, G. M. Steblov. (2018). Current State and Future Development of Active Satellite Geodetic Networks in Russia and Their Integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 23. 1. 6–27 [in Russian].
8. Herring, T. A., King, R. W., & McClusky S. C. (2010). Introduction to GAMIT-GLOBK. *Massachusetts Institute of Technology [Massachusetts Institute of Technology]*, Cambridge, Massachusetts.
9. Argus D. F., Gordon R. G. (1991). No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. *Geophysical research letters.* Vol. 18. No. 11. Pp. 2039–2042.
10. Altamimi, Z., Métivier, L. & Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *J. geophys. Res.* 117. DOI 10.1029/2011JB008930.
11. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., and Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* Vol. 121. Pp. 6109–6131. DOI 10.1002/2016JB013098.

12. Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., and Collilieux, X., (2017). ITRF2014 plate motion model. *Geophys. J. Int.* Vol. 209. No. 3. Pp. 1906–1912. DOI 10.1093/gji/ggx136.
13. V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, and A. V. Timofeev (2024). Variations of Displacement Fields and Seismicity in the Mountainous Altai. *Journal of Volcanology and Seismology*. Vol. 18. No. 4. Pp. 351–365. DOI: 10.1134/S0742046324700659.
14. Burgette R., McClusky S. C., Lejeune S., Watson C. S., McQueen H. (2013). A decade of horizontal deformation from great earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 118. 2371–2381. DOI 10.1002/jgrb.50154.
15. Melnik G. A., Steplov G.M. (2024). Stability of North Eurasia by space geodesy data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. No. 2. P. 3–15.
16. Ashurkov S. V. (2022). Strain rates for the southern Siberian craton derived from GPS measurements. *Geodynamics & Tectonophysics*. 13(1) [in Russian].
17. Timofeev V. Y., Timofeev A. V., Semibalamyt V. M. (2022). Deformation measurement at Baikal and Altai regions. «*Geofizicheskaia tehnologii*». No. 3. P. 34–48 [in Russian].
18. Timofeev V. Y., Timofeev A. V., Ardyukov D. G., Sizikov I. S., Nosov D. A. (2023). Modern displacements measurements at Talay station (south-west part of Baikal rift). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 28. 4. 59–70 [in Russian].

Об авторах

Владимир Юрьевич Тимофеев – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

Дмитрий Геннадьевич Ардюков – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Антон Владимирович Тимофеев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Author details

Vladimir Y. Timofeev – D. Sc., Chief Researcher.

Dmitriy G. Ardyukov – Ph. D., Senior Researcher.

Anton V. Timofeev – Ph. D., Senior Researcher.

Получено / Received 19.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.09.2025

Принята к публикации / Accepted 19.10.2025