ИРКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Выпуск 2. 2017 г.

Ответственные редакторы: академик И. В. Бычков, докт. физ.-мат. наук А. Л. Казаков

Иркутск Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН 2017 УДК 001.5 ББК Ч215 А43

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ ПРИБАЙКАЛЬЯ. Выпуск 2. 2017 г. / Отв. ред. И. В. Бычков, А. Л. Казаков. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2017. – 235 с.

Сборник включает статьи, содержащие результаты научных исследований по проектам, выполняемым в настоящее время в рамках регионального конкурса РФФИ, проводимого совместно Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Иркутской области.

Авторами работ рассмотрен широкий круг задач из различных областей науки и технологии, представляющих интерес как для Байкальского региона, так и для российской и мировой науки. Спектр научных направлений, представленных в сборнике, достаточно разнообразен и включает в себя вопросы экологии и региональной экономики Приангарья и Прибайкалья; создания новых химических веществ и лекарственных препаратов; геологии, биологии, геофизики и сейсмологии; экологически чистого энергоснабжения; медицины. Значительное число проблем исследуется авторами с применением современных математических и информационных технологий и методов компьютерного моделирования. Все статьи снабжены подробными аннотациями на английском языке, что делает результаты проведенных исследований доступными не только для российских, но и для зарубежных читателей.

Сборник предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и магистрантов, интересующихся вопросами экономического и социального развития территории, экологии и биологии, химии, наук о Земле.

> Рецензенты: академик М. И. Кузьмин, докт. биол. наук В. И. Воронин, докт. геогр. наук Ю. В. Рыжов

СОВРЕМЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА: ДЛИТЕЛЬНЫЕ ТРЕНДЫ И ВРЕМЕНЫЕ ВАРИАЦИИ

Саньков В. А.^{1, 2}, Лухнев А. В.¹, Мирошниченко А. И.¹, Перевалова Н. П.³, Добрынина А. А.¹, Саньков А. В.¹, Лебедева М. А.¹ ¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск ²Иркутский государственный университет, Иркутск ³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск е-mail: sankov@crust.irk.ru

Аннотация. Охарактеризованы современные вертикальные движения земной коры Прибайкалья и Забайкалья. Фоновую составляющую движений представляют результаты нивелирования, проведенного в регионе в XX в. Впервые приведены новые данные о вертикальных движениях, полученные с использованием результатов измерений на Байкальском геодинамическом полигоне методом GPS-геодезии. Выделены области унаследованного развития и области инверсии движений. На примере измерений в эпицентральной зоне Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (M = 6,3) на юге Байкала показаны проявления вариаций вертикальных движений, связанные с процессом подготовки сильного сейсмического события. Анализируются характерные длинные ряды вертикальных движений по данным постоянных GPS-измерений, иллюстрирующих сезонные вариации, различающиеся по амплитудам для разных пунктов.

Ключевые слова: GPS-геодезия, геодинамика, Байкальский регион, временные вариации.

CONTEMPORARY VERTICAL CRUSTAL MOVEMENTS OF BAIKAL REGION: LONG-TERM TRENDS AND TIME VARIATIONS

Sankov V. A.^{1, 2}, Lukhnev A. V.¹, Miroshnitchenko A. I.¹, Perevalova N. P.³, Dobrynina A. A.¹, Sankov A. V.¹, Lebedeva M. A.¹ ¹Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk ²Irkutsk State University, Irkutsk ³Institute of the Solar and Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk e-mail: sankov@crust.irk.ru

Abstract. The article describes contemporary vertical crustal movements of the Cis-Baikal and Transbaikal regions. The long-term component of the movements is represented by the results of the leveling carried out in the region in the 20^{th} century. For the first time new data on vertical movements obtained using the results of measurements at the Baikal geodynamic testing ground by GPS-geodesy are presented. Areas of inherited development and areas of inversion of movements are distinguished. On the example of measurements in the epicentral zone of the Kultuk earthquake on August 27, 2008 (M = 6.3) in the south of Lake Baikal, the variations of vertical movements associated with the process of a strong seismic event preparation are shown. Characteristic long records of the vertical movements are analyzed according to the permanent GPS-measurements illustrating seasonal variations that differ in amplitude for different sites.

Keywords: GPS-geodesy, geodynamics, Baikal region, time variations.

Введение. Современные движения земной поверхности являются продуктом сложных воздействий на земную кору эндогенных и экзогенных геологических, атмосферных

процессов, а также приливных воздействий Луны и Солнца и влияния других космогенных факторов. Максимальная интенсивность современных движений наблюдается в тектонически активных зонах литосферы, чаще всего на границах литосферных плит. На фоне главенствующей роли горизонтальных смещений литосферы, скорости которых достигают нескольких десятков мм/год, вертикальные движения имеют скорости, варьирующие в пределах первых десятков мм/год, а чаще всего не превышают 10 мм/год. Основная масса измерений современных вертикальных движений осуществляется традиционными геодезическими методами (нивелирование, уровнемерные измерения), а в последние десятилетия – спутниковыми методами (ГНСС и радарная интерферометрия). Длительные наблюдения за современными вертикальными движениями в тектонически активных внутриконтинентальных регионах показывают, что знак и интенсивность движений может меняться во времени на достаточно больших площадях. Примером этому служат результаты таких исследований в Кавказском регионе, где геодезические измерения производятся с конца XIX в. Между эпохами измерений, через 20-30 лет, происходили пространственновременные изменения вертикальных движений, часть из которых сопоставляют с возникновением сильных землетрясений в регионе, а часть - с похожими на волновые изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры [1]. Из мировой практики измерений известны и более короткопериодные изменения вертикальных движений, связанные с атмосферной [2], снеговой [3] нагрузками, с изменением уровней водоемов [4] и другими факторами.

Настоящая работа посвящена исследованию современных вертикальных движений земной коры территории Байкальского региона по данным измерений методом GPS-геодезии и подходу к изучению вклада разных составляющих скоростей вертикальных движений по данным постоянных измерений.

Длительные тренды современных вертикальных движений в Байкальском регионе по данным нивелирования. Многие из указанных выше особенностей современных движений земной коры проявляются в Байкальском регионе. В XX в. здесь были проведены широкомасштабные геодезические работы, результаты которых в части нивелирования на длинных профилях легли в основу карты современных вертикальных движений земной коры территории СССР [5], фрагмент которой с изменениями представлен на рис. 1. Карта характеризует длительный период измерений – более 50 лет, и показывает основные тренды вертикальных движений территории. Положительные движения земной коры приурочены к подвижным областям (Забайкалье, Хамар-Дабан, Восточный Саян), а также к Ангаро-Ленскому неотектоническому поднятию на Сибирской платформе. Области погружения на карте выделены серым цветом, изолинии проведены через 2 мм/год. Они охватывают северную часть Предбайкальского прогиба, Предсаянский прогиб и прилегающие к нему части платформы, а также центральную часть Байкальской впадины. Кроме того, в погружение вовлечены часть Окинского плато и Восточно-Тувинское нагорье, а также внутренние области Патомского нагорья на северо-востоке площади.

Значения скоростей вертикальных движений варьируют от -8,0 до +21,4 мм/год. Абсолютный минимум приурочен к локальному опусканию на Сибирской платформе в районе г. Братска и, по-видимому, связан с заполнением Братского водохранилища. По данным ежегодного нивелирования, с 1961 г. по 1967 г. амплитуда опускания основания плотины достигла 50 мм [6]. Дальнейшие вариации в измерениях были связаны с процессом заполнения и сработки водохранилища. Похожий локальный минимум с меньшим значение скорости (-3,5 мм/год) располагается на побережье в верхней части водохранилища. Абсолютный максимум связан с поднятием хр. Улан-Бургасы в Бурятии, на его стыке с Витимским плоскогорьем, где располагается кайнозойское Витимское плато базальтов. Заметные максимумы приурочены к западному плечу Байкальской впадины, где они соседствуют с погружениями блока Приольхонья и Онгуренской переходной ступени. За период измерений Забайкалье показывает устойчивую тенденцию к поднятию с умеренными скоростями – около +2–3 мм/год, исключая Селенгинскую депрессию, где ско-

рости поднятия несколько ниже. На северо-восточном замыкании Хэнтей-Даурского свода наблюдается обширный максимум вертикальной скорости, что соответствует его морфологии и направленности неотектонических движений. Максимум СВ простирания со скоростями до +10 мм/год приурочен к долине р. Бол. Белая и протягивается из блока Восточного Саяна в Присанский блок.



Рис. 1. Современные вертикальные движения по данным нивелирования.

Современные вертикальные движения по данным измерений на Байкальском геодинамическом GPS-полигоне. Байкальский геодинамический GPS-полигон организован в рамках российско-французского научного сотрудничества в 1994 г. Сеть полигона постепенно наращивалась и в настоящее время насчитывает более 70 пунктов полевых и постоянных измерений. Данные о закономерностях проявления горизонтальных движений и деформаций в пределах Байкальской рифтовой системы и прилегающих активных структур опубликованы [7, 8]. Показано, что основным трендом в пределах полигона является юго-восточное смещение Забайкальского блока относительно блока Сибирской платформы со скоростью $3,4 \pm 0,7$ мм/год. Скорость деформации в пределах Байкальской впадины достигает $3,1 \times 10^{-8}$ год⁻¹ и постепенно уменьшается в обе стороны поперек структуры.

Справедливо считается, что ошибка определения вертикальной компоненты современных движений по данным спутниковой геодезии в два, а иногда и более раз выше, чем таковая для горизонтальных движений. Однако накопленный к настоящему времени материал GPS-измерений позволяет проанализировать закономерности проявления вертикальных смещений в пределах Байкальского геодинамического полигона. Нами собраны материалы многолетних измерений на полевых пунктах полигона, где измерения с продолжительностью 3–4 сут. производились ежегодно или эпизодически в летний период не менее трех раз. Кроме того, были собраны данные измерений на постоянных пунктх в пределах региона. Они были обработаны с использованием программного пакета GAMIT-GLOBK [9]. Применяя метод двойных разностей, мы получили координаты региональных станций и их приращения, параметры движения спутников, 13 зенитных задержек для каждой станции и дня измерений, а также фазовые неопределенности. Для получения решения использовались финальные орбиты спутников, полученные IGS [10], параметры ориентации вращения Земли (IERS), таблицы зависимостей фазовых центров от азимута и угла прихода спутникового сигнала [11], таблицы параметров Солнца и Луны, а также все материалы, рекомендованные Международной GPS-службой.

Путем визуального осмотра ежедневных временных рядов положения станций мы определяем разрывы или смещения, вызванные изменениями в смене антенны или приемника, а также за счет землетрясений. Эти смещения учитываются при расчетах скоростей, также удаляются некоторые периоды во временных рядах с нелинейным отклонением от фонового тренда, эти деформации подразумеваются как постсейсмические.

После этапа проверки временных рядов мы объединили наши региональные выводы с глобальным решением, используя станции, входящие в систему IGS (ARTU, BADG, BJFS, CHUM, FAIR, GRAZ, IISC, IRKT, KHAJ, KIT3, KOKB, KUNM, LHAZ, MAG0, NRIL, NVSK, ONSA, PETP, PETS, POL2, SELE, SHAO, TIDB, TIXI, TSKB, ULAB, URUM, USUD, WUHN, XIAN, YAKT). Это помогает повысить разрешение сигнала над уровнем шума и позволяет оптимально связать наше решение с Международной земной системы отсчета (ITRF) [12].

Использование пакета GLOBK [9] позволяет получить единое решение (позицияскорость) путем объединения ежедневных решений глобальной (IGS) и региональной сетей, минимизируя отклонения в позициях и скоростях в эталонных (IGS) сетях, используя для преобразования 12 параметров Хелмерта. Полученное решение представляет набор координат, скоростей и их приращений, выраженных в ITRF2014 [12]. Для анализа представлены только вертикальные компоненты смещений пунктов полигона, рассчитанные относительно пункта IRKT в г. Иркутске (рис. 2). Формальные ошибки скоростей зависят от количества эпох измерений и варьируют от 0,05 мм/год для постоянных станций до 2,65 мм/год для пунктов с 3–4 эпохами измерений.

Из приведенной карты (см. рис. 2) видно, что за период измерений с 1994 г. по 2017 г. в пределах полигона проявлены как восходяшие (стрелка направлена вверх), так и нисходящие (стрелка направлена вниз) движения земной коры. В пунктах, которые наблюдались длительное время, скорости не превышают, как правило, 2-3 мм/год. Аномально высокие скорости достигают для участков погружения – 11–14 мм/год, а для поднятий – +8.2 мм/год. Часть больших значений связана с относительно малым количеством эпох измерений и большой их ошибкой. Другая часть, по-видимому, связана с локальными условиями в окрестности пункта. Обширная область движений отрицательного знака наблюдается в центральной части Байкальской впадины (см. рис. 2). Она включает о. Ольхон, п-ов Святой Нос, прилегающую часть восточного борта впадины и западный борт Баргузинской впадины. При этом восточный борт впадины испытывает поднятие (пункт SUVO). Максимальное значение скорости опускания в этой области получено для о. Бол. Ушканий – до –3,13 мм/год. Сопоставление с данными нивелирования показывает, что тенденция опускания для центральной части Байкальской впадины наследуется с прошлого века (см. рис. 1). Другая обширная область опускания земной коры локализуется в Забайкалье. Эта территория испытала инверсию движений, поскольку, по данным нивелирования, она испытывала поднятие (см. рис. 1). Пункты, расположенные в Присаянском блоке (HADR) и в Торской впадине (TOR1), погружаются с небольшими скоростями, а расположенные по бортам Южно-Байкальской впадины движутся разнонаправленно.

Временные вариации современных вертикальных движений в Байкальском регионе. Анализ длинных временных рядов измерений вертикальных движений для некоторых полевых пунктов полигона, а также рядов постоянных измерений, показывает на-

личие в них разного рода вариаций. В частности, сопоставления временных рядов для пункта IRKT с рядами пунктов SLYU (г. Слюдянка) и KULT (пос. Култук), которые находятся в районе южной оконечности оз. Байкал в ближайшей окрестности эпицентральной зоны Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (M = 6,3), показывают, что с начала наблюдений в 1994 г. в течение 10 лет последние испытывали стабильное синхронное абсолютное поднятие со скоростью около 3 мм/год (рис. 3). Затем до момента землетрясения наблюдались слабые дифференцированные движения пунктов, а сразу после него произошло разноамплитудное их опускание. При этом пункт IRKT оставался стабильным.



Рис. 2. Современные вертикальные движения по данным GPS-измерений.



Рис. 3. Изменения высот пунктов и поля силы тяжести в связи с Култукским землетрясением.

Прецизионные измерения поля силы тяжести, проведенные в этот период на станции «Талая» вблизи г. Слюдянка и в Иркутске, указывают на похожие тенденции изменения Δg [13] (см. рис. 3). Таким образом, перед сейсмическим событием, скорее всего, происходило сжатие, уплотнение и поднятие земной коры в области подготовки, а затем опускание и разуплотнение. Поднятие в зоне подготовки Южно-Байкальского землетрясения 25.02.1999 г. (M = 5,9) наблюдались нами на пункте LIST (пос. Листвянка).

Максимально полную информацию о вариациях современных движений могут дать длительные ряды GPS-измерений на постоянных пунктах. На рис. 4 приведены временные



ряды для постоянных пунктов IRKT (г. Иркутск), ULAZ (г. Улан-Удэ) и BADG (Бадары, Тункинская впадина) с их ошибками. Сезонные вариации средней высоты пунктов (Up) достигают 10-25 мм в зависимости от их расположения. Максимальные вариации средних значений наблюдаются для пункта IRKT, а минимальные – для пункта ULAZ. В отдельных случаях, особенно в зимний период, разброс значений увеличивается, что, по-видимому, связано с локальными условиями на станции, такими, например, как наличие снежного покрова на антенне и др. При этом трендовые составляющие невелики.

Рис. 4. Временные ряды высот постоянных пунктов IRKT, ULAZ и BADG.

Периодические изменения высот постоянных GPS-пунктов на территории России, в том числе и пункта в Иркутске, связывались с сезонными изменениями атмосферной нагрузки [14]. Если это справедливо, то в силу своей обширности зона влияния Сибирского антициклона, например, должна нагружать все перечисленные пункты одинаково. Однако, как видно на рис. 4, отклик земной коры на эту нагрузку отличается в разных частях региона. Дальнейшие детальные исследования временных рядов помогут дать ответ на вопрос, является ли такое различие в реакции отражением свойств литосферы под станцией или локально действуют другие факторы, усиливающие или ослабляющие эффект атмосферного воздействия. В частности, расположение пункта IRKT в непосредственной близости к Иркутскому водохранилищу позволяет предполагать наличие дополнительной нагрузки от изменения уровня водоема. Выделение этого сигнала для станций, расположенных на побережье водохранилища и оз. Байкал, позволит произвести оценку дополнительных упругих нагрузок, воздействующих на сейсмоактивные разломы при изменении уровня озера.

Выводы. Исследования показывают, что современные вертикальные движения земной коры Байкальского региона вне зависимости от способа их измерений характери-

зуются пространственно-временными вариациями. Приведенные в настоящей работе данные измерений методом GPS-геодезии свидетельствуют о наличии в текущий период областей с унаследованным развитием современных вертикальных движений, таких как центральная часть Байкальской впадины, а также областей инверсии, таких как южная часть Забайкалья. Изменения скоростей и знака движений происходят и в локальных областях в связи с процессами подготовки землетрясений, что видно на примере эпицентральной зоны Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (M = 6,3). Данные длительных измерений на постоянных пунктах указывают на сильную сезонную составляющую изменений высот, достигающую 20–25 мм.

Дальнейшие детальные исследования длительных временных рядов измерений вертикальной составляющей современных движений земной коры на Байкальском полигоне позволят выделить вклад различных составляющих в вариации скоростей движений, включая атмосферные, гидросферные и тектонические нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 17-45-388088.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кафтан В. И., Кузнецова Ю. Г., Лилиенберг Д. А., Серебрякова Л. И. Исследование современных вертикальных движений земной коры в Кавказском регионе по геодезическим данным // Геодезия и картография. – 1998. – № 3. – С. 36–44.

2. Van Dam T. M., Wahr J. Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements // J. Geophys. Res. – 1987. – V. 92. – P. 1281–1286.

3. *Heki K*. Seasonal modulation of interseismic strain buildup in Northeastern Japan driven by snow loads // Science. – 2001. – Vol. 293. – P. 89–92.

4. *Elósegui P., Davis J. L., Mitrovica J. X., Bennett R. A., Wernicke B. P.* Crustal loading near Great Salt Lake, Utah. Geophys. Res. Lett. – 2003. – V. 30 (3). – P. 1111.

5. *Карта* современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР (СВДЗК). М-б 1 : 5 000 000 / Ред. С. В. Погораздова. – Баку: Фабрика № 11 ПО «Азербайджанаэрогеодезия» ГУГК СССР, 1989. – 1 л.

6. *Иванов В. Г.* Упругие деформации основания бетонной плотины Братской ГЭС // Гиротехническое строительство. – 1984. – № 10. – С. 25–27.

7. Лухнев А. В., Саньков В. А., Мирошниченко А. И., Ашурков С. В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 7. – С. 1006–1017.

8. Саньков В. А., Лухнев А. В., Мирошниченко А. И. [и др.] Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 70–79.

9. *Herring T., King B., McClusky S.* Introduction to Gamit/Globk Reference Manual Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program. – Release 10.3, Mass. Inst. of Technol. – Cambridge, 2010. – 50 P.

10. *Beutler G., Kouba J., Springer T.* Combining the orbits of the IGS processing centers // Proceeding of the IGS Analysis Center Workshop / Ed. by J. Kuba/ Geodin. Surv. of Can., Geomatics Can., Nat. Resour. Can., Ottawa, Ontario, 1993. – P. 20–56.

11. Schmid R., Steigenberger P., Gendt G., Ge M., Rothacher M. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas, J. Geod. $-2007. - N_{2} \ 81 \ (12). - P. \ 781-798.$

12. *Altamimi Z., Metivier L., Rebishung P., Xavier C.* ITRF2014 plate motion model, Geophysical Journal International. – 2017. – V. 209 (3). – P. 1906–1912.

13. Арнаутов Г. П., Калиш Е. Н., Лухнев А. В. [и др.] Мониторинг вертикальных движений земной поверхности на пунктах Байкальского геодинамического полигона по данным гравиметрических и GPS наблюдений // Материалы конф. ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2013 (24–26 апреля 2013 г.). – Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 203–208.

14. *Малкин 3. М.* Влияние атмосферной нагрузки на координаты и скорости ГНСС-станций // Геодезия и картография. – 2008. – № 4. – С. 31–34.

Статья принята в редакцию 25.12.2017 г.

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Выпуск 2. 2017 г.

Литературные редакторы И. Б. Бражникова, Г. П. Созонтова Технический редактор А. И. Шеховцов Дизайнер И. М. Батова

Подписано в печать 29.12.2017 г. Формат 60×90/8. Гарнитура Times New Roman. Бумага Ballet. Уч.-изд. л. 25,7. Усл. печ. л. 27,3. Тираж 125 экз. Заказ № 800.

Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1