



SHARED RESEARCH FACILITIES "SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS AND CONTROL OF NEAR-EARTH SPACE" ("THE ANGARA") AS APPLIED FOR GEODYNAMICS AND TECTONOPHYSICS

Yu.V. Yasyukevich ✉, A.M. Vesnin 

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 126a Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The paper considers an experimental complex of the Shared Research Facilities "The Angara" of ISTP SB RAS. Although the centre aims to study Near-Earth space, scientists could use some equipment for research in geodynamics. We mainly described the Siberian network of receivers of signals from global navigation satellite systems SibNet that currently includes ten receiving points. We also provide information on the fields where "non-geodynamic" equipment can be used for multidisciplinary studies of lithospheric processes.

KEYWORDS: Shared Research Facilities; GPS; geodynamics; ionosphere effects; multidisciplinary researches

FUNDING: The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, RFBR and Government of the Irkutsk Region, project 20-45-383010. The study was based on data from the Shared Research Facilities "The Angara" of the ISTP SB RAS, International GNSS Service, Geospatial Information Authority of Japan, and OMNI Database.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 7, 2021

Revised: January 10, 2022

Accepted: January 20, 2022

Correspondence: Yury V. Yasyukevich, yasyukevich@iszf.irk.ru

FOR CITATION: Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., 2022. Shared Research Facilities "Solar-Terrestrial Physics and Control of Near-Earth Space" ("The Angara") as Applied for Geodynamics and Tectonophysics. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0593. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0593

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ «СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА И КОНТРОЛЬ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА» (ЦКП «АНГАРА») ПРИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Ю.В. Ясюкевич, А.М. Веснин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлен экспериментальный комплекс центра коллективного пользования «Ангара» ИСЗФ СО РАН. Несмотря на то, что основное назначение инструментов – изучение околоземного космического пространства, часть инструментов может использоваться для проведения геодинимических исследований. Основное внимание уделено сибирской сети приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet, включающей в настоящее время десять приемных пунктов. Также приведены некоторые сведения о том, в каких областях «негеодинамические» инструменты могут быть использованы при проведении мультидисциплинарных исследований литосферных процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: центр коллективного пользования; GPS; геодинимика; ионосферные эффекты; мультидисциплинарные исследования

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, а также РФФИ и правительства Иркутской области, проект № 20-45-383010. В исследовании использованы данные ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН, Международной службы ГНСС (IGS), Государственной палаты по геопространственной информации Японии (GSI), Центра данных о физике космоса НАСА (база данных OMNI).

1. ВВЕДЕНИЕ

Центр коллективного пользования научным оборудованием «Солнечно-земная физика и контроль околоземного космического пространства» (ЦКП «Ангара») (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>) создан в 2003 г. на базе Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН). В 2016 г. в соответствии с требованиями Федерального закона № 270 от 13.07.2015 г. ЦКП «Ангара» был реорганизован как совокупность структурных подразделений ИСЗФ СО РАН.

Основные задачи ЦКП лежат в области солнечно-земной физики, современных проблем астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, включая физику Солнца, межпланетной среды, магнитосферы, ионосферы и атмосферы, а также развития методов и аппаратуры исследований в области астрофизики и геофизики.

Научное оборудование ЦКП может быть использовано для смежных и мультидисциплинарных задач. Одной из таких задач является изучение сейсмоионосферного и сейсмоэлектромагнитного взаимодействия [Zherebtsov, 2012]. Входящая в состав ЦКП сеть навигационных приемников (обеспечивающая в области солнечно-земной физики мониторинг ионосферы [Afraimovich et al., 2013]) может использоваться по прямому назначению для исследования геодинимических процессов.

В настоящей работе обсуждается оборудование ЦКП «Ангара» и его возможности для решения задач геодинимики. Основное внимание уделяется сети навигационных приемников сигналов GPS/ГЛОНАСС.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ЦКП «АНГАРА»

ЦКП «Ангара» включает инструменты нового поколения, которые создают возможности получения

уникальных данных по солнечной активности и ее проявлениям в околоземном космическом пространстве, в том числе:

- 1) автоматизированный солнечный телескоп;
- 2) астроизмерительный комплекс;
- 3) комплекс цифровых ионозондов DPS-4;
- 4) магнитометрический комплекс;
- 5) многопозиционный ионозонд с линейной частотной модуляцией излучаемого сигнала;
- 6) оптический комплекс;
- 7) прибайкальскую сеть приемников ГЛОНАСС/GPS;
- 8) саянский спектрографический комплекс космических лучей;
- 9) сеть когерентных ионосферных КВ-радаров;
- 10) солнечный телескоп оперативных прогнозов;
- 11) иркутский радар некогерентного рассеяния, уникальную научную установку рег. № 01-28.

Оборудование размещается на полигонах ИСЗФ СО РАН (в основном в Прибайкальском регионе) и, в отдельных случаях, на полигонах организаций Минобрнауки России. Рис. 1 показывает расположение оборудования. Три пункта являются удаленными и располагаются вблизи г. Магадана, г. Норильска и г. Екатеринбурга. Обсерватория вблизи г. Норильска имеет пункт наблюдения непосредственно на полярном круге (70° N).

Созданная экспериментальная база является заделом для реализации проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук (НГК РАН)» [Zherebtsov, 2020].

3. СЕТЬ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Для решения задач геодинимики наибольший интерес представляют приемники сигналов глобальных

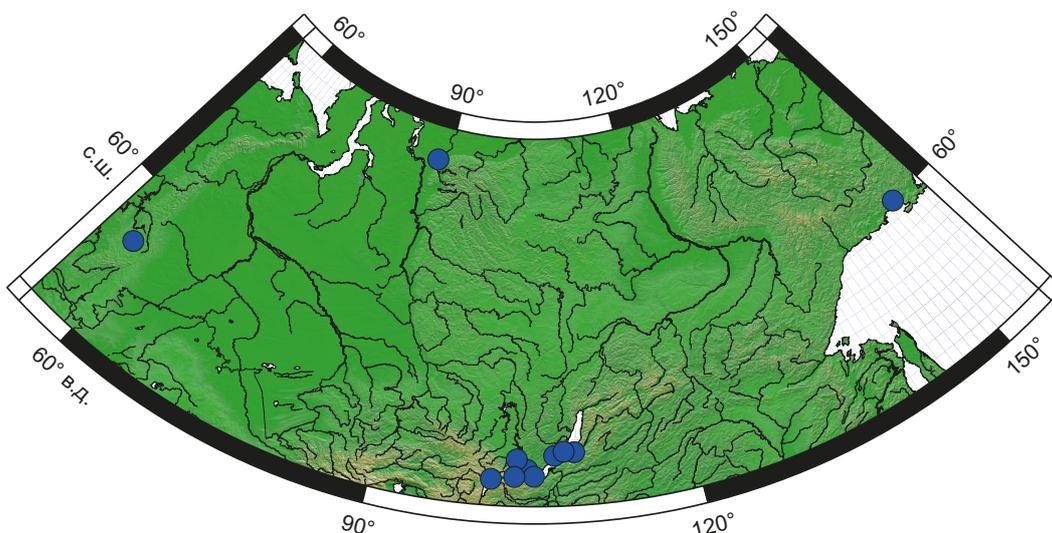


Рис. 1. Расположение экспериментального оборудования ЦКП «Ангара».

Fig. 1. Location of the experimental facilities of "The Angara".



Рис. 2. Оборудование сети SibNet. Сверху – навигационные приемники JAVAD Delta-G3T, Septentrio Polar Rx5, NovAtel GPStation-6. Снизу – антенны JAVAD GrAnt-G3T, JAVAD RingAnt-G3T, NovAtel GNSS-750.

Fig. 2. SibNet equipment. Navigation receivers (top) – JAVAD Delta-G3T, Septentrio Polar Rx5, NovAtel GPStation-6; antennas (bottom) – JAVAD GrAnt-G3T, JAVAD RingAnt-G3T, NovAtel GNSS-750.

навигационных спутниковых систем (ГНСС). В рамках ЦКП «Ангара» функционирует сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet (Siberian GNSS Network) [Yasyukevich et al., 2018]. Расположение приемных пунктов сети SibNet соответствует (за исключением обсерватории Бадары) расположению обсерваторий, представленных на рис. 1. Сеть включает десять пунктов, и один планируется к установке (г. Екатеринбург).

В ИСЗФ СО РАН данные с приемников SibNet направлены на решение задач исследования физики ионосферы, но они могут использоваться и при геодинимических измерениях.

Сеть SibNet использует мультимастотные приемники геодезического класса (рис. 2):

1. Приемники Javad Delta-G3T, составляющие основу сети, позволяющие принимать сигналы GPS/ГЛОНАСС/Galileo в диапазонах L1/L2/L5. Частота регистрации данных составляет от 1 до 50 Гц. В одном экземпляре имеются приемники Javad SigmaQ и Javad Delta-3N. Первый способен обеспечивать прием сигналов на четырех разнесенных антеннах. Второй является следующим поколением Javad Delta-G3T с улучшенными приемными характеристиками и возможностью приема помимо сигналов GPS/ГЛОНАСС/Galileo также сигналов спутников китайской системы BeiDou/Compass.

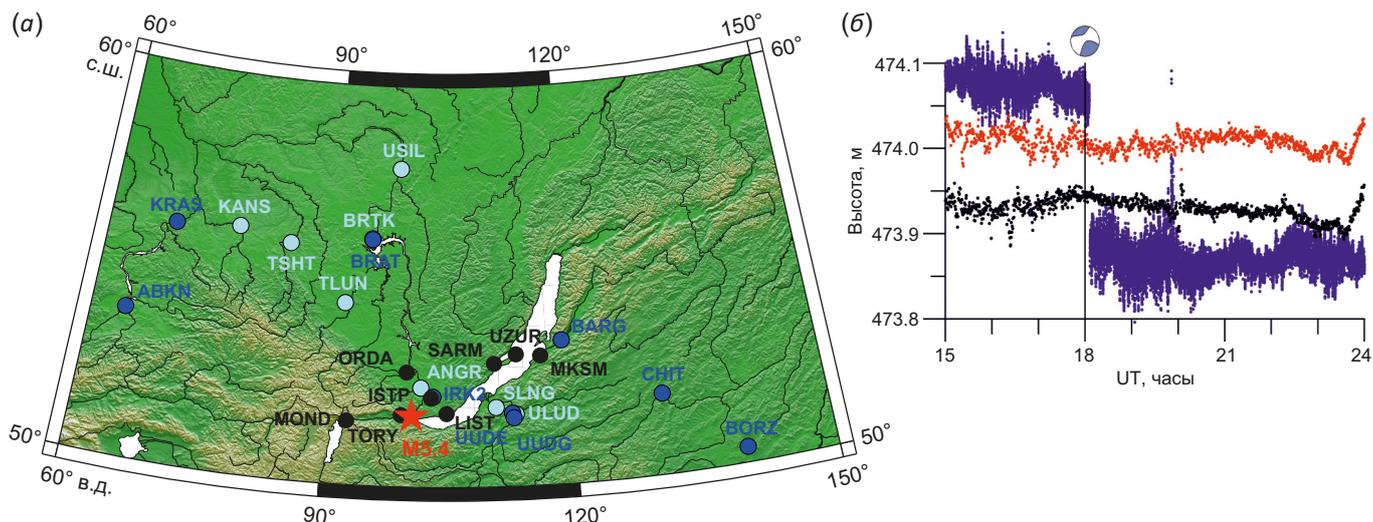


Рис. 3. Постояннодействующие сети в Прибайкальском регионе (слева) и изменение высоты на станциях SibNet 21 сентября 2020 г.

(а) – черные точки – приемники ЦКП «Ангара»; синие точки – HIVE; светло-голубые точки – EFT-CORS; красная звездочка отмечает эпицентр землетрясения. (б) – черные точки – LIST, красные точки – MOND, синие точки – TORY. Линия отмечает момент землетрясения.

Fig. 3. Permanent networks in the Baikal region (left) and altitude changes at SibNet stations on September 21, 2020.

(а) – black dots – receivers of "The Angara"; blue dots – HIVE; light blue dots – EFT-CORS; the red asterisk marks the epicenter of the earthquake. (б) – black dots – LIST, red dots – MOND, blue dots – TORY. The line marks the moment of the earthquake.

2. Приемники с дополнительными функциями, в частности измерения амплитудных мерцаний, NovAtel GPStation-6, осуществляющие двухчастотный прием сигналов GPS и ГЛОНАСС. Частота регистрации «сырых» данных до 50 Гц.

3. Приемник Septentrio PolaRx5, представляющий собой мультисистемный мультичастотный навигационный приемник (ионосферный монитор), способный принимать различные сигнальные компоненты GPS/ГЛОНАСС/Galileo/BeiDou. Частота регистрации «сырых» данных до 100 Гц.

Основной используемой антенной постоянно действующих станций является антенна JAVAD RingAnt-G3T с подавлением многолучевости. Антенны NovAtel GNSS-750 используются совместно с NovAtel GPStation-6 для проведения длительных экспериментов. Несколько легких антенн JAVAD GrAnt-G3T и антенна GPS-703-GGG используются для краткосрочных экспериментов.

В Прибайкальском регионе сеть дополняют станции сетей EFT-CORS и HIVE. Четыре станции могут быть использованы по аналогии со станциями EFT-CORS и другими, так как на них обеспечен постоянный поток данных реального времени через протокол NTRIP [Weber et al., 2005].

Продемонстрируем возможности оборудования при мониторинге землетрясений. Левая панель рис. 3 показывает геометрию эксперимента во время землетрясения 21 сентября 2020 г. Землетрясение произошло в 18:04:58 UT в районе оз. Байкал и имело магнитуду 5.4, глубину 19 км (<http://geofon.gfz-potsdam.de/>). Эпицентр показан красной звездочкой. Цветом отмечены различные приемники сигналов ГНСС.

Наиболее близко расположенными к эпицентру являлись станции сети SibNet. На рис. 3, б, показано изменение высоты антенны сети (одностанционное решение Precise point positioning). Большой шум в данных станции TORY, которая располагалась наиболее близко к эпицентру, связан с более высоким временным разрешением.

После землетрясения произошел сбой измерений навигационного приемника TORY, поэтому имеется разрыв в данных станции. В этой связи изменение высоты нельзя впрямую интерпретировать, хотя ее перепад составляет ~10 см.

Следует отметить, что около 20 UT (через два часа после землетрясения) на разных приемниках наблюдаются вариации высоты, причем наибольшие отклонения соответствуют приемнику TORY.

4. СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА И ГЕОДИНАМИКА

В современном понимании система Солнце – солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – литосфера является единой сложной и нелинейно связанной системой, поэтому процессы, происходящие в различных ее частях, могут находить отклик, проецироваться в других, а особенности этого отклика – давать более глубокое понимание происходящих процессов. Изучение таких проекций отклика важно, поскольку позволяет посмотреть на одни и те же процессы с разных сторон. В этой связи оборудование ЦКП «Ангара» может использоваться для проведения мультидисциплинарных измерений.

Сейсмoeлектромагнетизм – одно из развивающихся научных направлений. Оно включает широкий круг

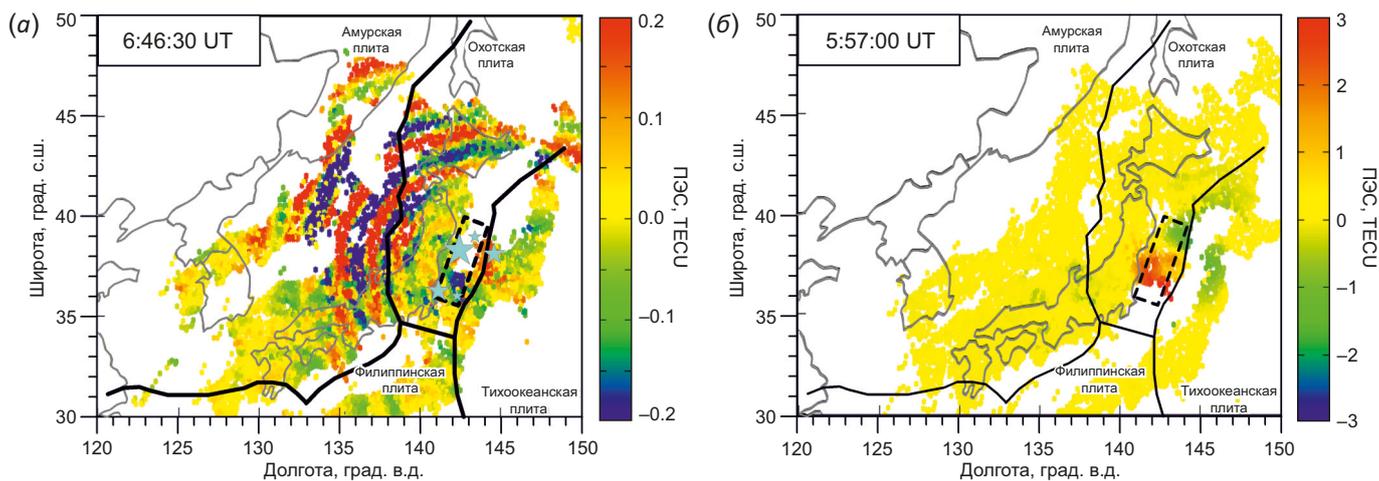


Рис. 4. Распределение вариаций полного электронного содержания после землетрясения Tohoku 11 марта 2011 г. (а) – акустическая мода; (б) – ионосферное возмущение, связанное с поверхностной волной Рэлея.

Fig. 4. Distribution of total electron content variations after the March 11, 2011 Tohoku earthquake. (а) – the acoustic mode; (б) – the ionospheric disturbance associated with the Rayleigh surface wave.

вопросов, в том числе сейсмогенные электромагнитные эмиссии, изменение электропроводности геологической среды вследствие тектонической активности, изучение электрических свойств как индикатора механических процессов.

Направление сейсмоионосферного взаимодействия включает исследования модификации ионосферы Земли вследствие процессов в литосфере. Наиболее известно постсейсмическое воздействие. Его основные типы – ионосферные аномалии и перемещающиеся ионосферные возмущения. Первые наблюдаются в виде локального изменения ионосферной электронной концентрации на тех или иных высотах (и изменения полного электронного содержания), вторые – в виде возбуждения внутренних гравитационных волн, акустико-гравитационных колебаний и быстрых возмущений, порождаемых волнами Рэлея. Такие волны (все три типа) наблюдались во время одного из сильнейших землетрясений – Tohoku 11 марта 2011 г. в Японии [Yasyukevich et al., 2015].

На рис. 4 представлены изображения перемещающихся ионосферных возмущений, порожденных этим землетрясением: слева – акустическая мода, имеющая кольцевую форму, справа – мода, ассоциированная с волной Рэлея. Изображения основаны на измерениях полного электронного содержания приемников ГНСС, из данных которых выделены соответствующие моды. Наблюдаемая картина показывает связь ионосферных возмущений и сейсмичности. Следует отметить, что основная энергия ионосферного возмущения, связанного с волной Рэлея, распространялась параллельно линии контакта плит.

Амплитуда ионосферного отклика зависит от интенсивности землетрясения [Astafyeva et al., 2013]. При этом, по всей видимости, существует порог, когда генерируемые возмущения по амплитуде превышают естественные ионосферные шумы [Perevalova et al., 2014].

Отдельно стоят задачи поисков предвестников землетрясений. Международным сообществом активно ведутся исследования вопроса кратковременного прогноза землетрясений в электромагнитных [Dovbnaya et al., 2019] и ионосферных [Pulinets et al., 2004] параметрах. В качестве физического механизма предвестника, как правило, называют проникновение приземного электрического поля сейсмического генезиса в ионосферу [Rapoport et al., 2020] и эманацию радона [Pulinets, 2011]. Следует отметить, что анализ пост- и преэффектов, связанных с геодинимическими явлениями, требует детального изучения ионосферной обстановки, так как есть вероятность связать с геодинимическими процессами аномалии, обусловленные, например, изменением солнечной активности [Afraimovich, Astafyeva, 2008].

С другой стороны, околоземное пространство (космическая погода) само может влиять на состояние геодинимической обстановки. Так, в работе [Duma, Ruzhin, 2003] показано, что число землетрясений в отдельных областях коррелирует с изменением напряженности магнитного поля Земли, связанным с вариацией давления солнечного ветра. Увеличение вероятности возникновения землетрясений для таких регионов следует учитывать в моделях, а информация из центров прогноза космической погоды должна поступать и в центры мониторинга геодинимической обстановки. Для Прибайкальского региона аналогичные исследования и мониторинг могут выполняться с привлечением оборудования ЦКП «Ангара». Следует отметить, что единое мнение о влиянии космической погоды на геодинимические процессы отсутствует и вопрос активно дискутируется. В работе [Love, Thomas, 2013], например, отмечается отсутствие значимой корреляции частоты землетрясений с параметрами солнечной активности (число солнечных пятен, скорость солнечного ветра, геомагнитная активность).

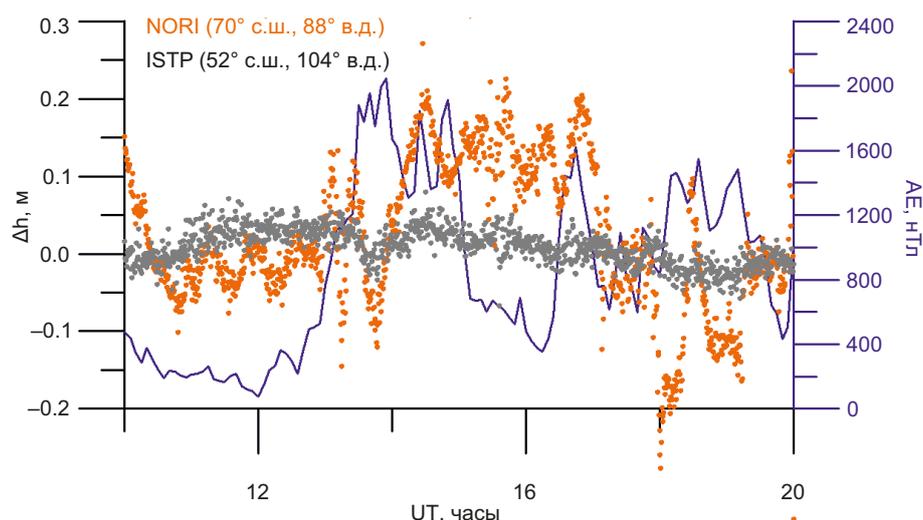


Рис. 5. Динамика отклонений измерения высоты на станциях NORI (оранжевые точки) и ISTP (серые точки) во время магнитной бури 17 марта 2017 г. Для сравнения синей кривой приведена динамика индекса АЕ (шкала справа), характеризующего развитие возмущений магнитного поля в области высоких широт.

Fig. 5. Dynamics of height measurement deviations at the NORI (orange dots) and ISTP (gray dots) stations during the magnetic storm on March 17, 2017. For comparison, the blue curve shows the dynamics of the AE index (the scale on the right), which characterizes the development of magnetic field disturbances in the region of high latitudes.

Важным аспектом является то, что космическая погода существенно влияет на точность определения координат при использовании ГНСС [Demyanov, Yasyukevich, 2021]. На рис. 5 представлена динамика отклонения измеряемой высоты в высокоточном режиме (precise point positioning) GPS во время магнитной бури 17 марта 2015 г. Синяя линия показывает динамику индекса АЕ (развитие аврорального электроджета и возмущенности геомагнитного поля в высоких широтах). Оранжевые и серые точки – ошибка измерения высоты на станциях NORI и ISTP соответственно. Во время наиболее сильных возмущений в околоземном пространстве наблюдаются значительные вариации высоты станции. Особенно это выражено для высоких широт (станция NORI) вследствие худшей геометрии наблюдаемого созвездия спутников. Это указывает на необходимость контроля космической погоды при использовании навигационного оборудования, в частности в высоких широтах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлен комплекс инструментов ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН. Несмотря на то, что основное назначение инструментов – изучение околоземного космического пространства, некоторые инструменты, в частности сибирская сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet, могут использоваться для проведения геодинимических исследований. Кроме того, инструменты комплекса можно использовать для изучения сейсмоионосферного и сейсмоэлектромагнитного взаимодействия, т.е. «негеодинамические» инструменты ЦКП «Ангара» также могут быть полезны для решения задач геодинимики и тектонофизики.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЦКП «Ангара» за многолетний труд по обеспечению работы оборудования, в особенности секретарю ЦКП Н.А. Провосецкой за проведение организационной работы. Авторы признательны провайдером данных в Сибирском регионе (EFT-CORS и HIVE).

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., 2008. TEC Anomalies – Local TEC Changes Prior to Earthquakes or TEC Response to Solar Activity Changes? *Earth, Planets and Space* 60, 961–966. <https://doi.org/10.1186/BF03352851>.
- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavriluk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. et al., 2013. Review of GPS/GLONASS Studies of the Ionospheric Response to Natural and Anthropogenic Processes and Phenomena. *Journal of Space Weather and Space Climate* 3, A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>.

Astafyeva E., Shalimov S., Olshanskaya E., Lognonné P., 2013. Ionospheric Response to Earthquakes of Different Magnitudes: Larger Quakes Perturb the Ionosphere Stronger and Longer. *Geophysical Research Letters* 40 (9), 1675–1681. <https://doi.org/10.1002/grl.50398>.

Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., 2021. Space Weather: Risk Factors for Global Navigation Satellite Systems. *Solar-Terrestrial Physics* 7 (2), 28–47. <https://doi.org/10.12737/stp-72202104>.

Dovbnya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A., 2019. Short-Term Electromagnetic Precursors of Earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 731–740 (in Russian) [Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 731–740]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438>.

Duma G., Ruzhin Y., 2003. Diurnal Changes of Earthquake Activity and Geomagnetic Sq-Variations. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3 (3/4), 171–177. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-171-2003>.

Love J.J., Thomas J.N., 2013. Insignificant Solar-Terrestrial Triggering of Earthquakes. *Geophysical Research Letters* 40 (6), 1165–1170, <https://doi.org/10.1002/grl.50211>.

Perevalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityaeva A.S., 2014. Threshold Magnitude for Ionospheric TEC Response to Earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 108, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.014>.

Pulinets S.A., 2011. The Synergy of Earthquake Precursors. *Earthquake Science* 24, 535–548. <https://doi.org/10.1007/s11589-011-0815-1>.

Pulinets S.A., Gaivoronska T.B., Leyva Contreras A., Ciraolo L., 2004. Correlation Analysis Technique Revealing Ionospheric

Precursors of Earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4, 697–702. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299217>.

Rapoport Yu., Grimalsky V., Krankowski A., Pulinets S., Fedorenko A., Petrishchevskii S., 2020. Algorithm for Modeling Electromagnetic Channel of Seismo-Ionospheric Coupling (SIC) and the Variations in the Electron Concentration. *Acta Geophysica* 68, 253–278. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00385-0>.

Weber G., Dettmering D., Gebhard H., 2005. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). In: F. Sansò (Ed.), *A Window on the Future of Geodesy*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 60–64. https://doi.org/10.1007/3-540-27432-4_11.

Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., Perevalova N.P., 2018. SibNet – Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current State. *Solar-Terrestrial Physics* 4 (4), 63–72. <http://doi.org/10.12737/stp-44201809>.

Yasyukevich Y.V., Zakharov V.I., Kunitsyn V.E., Voeikov S.V., 2015. The Response of the Ionosphere to the Earthquake in Japan on March 11, 2011 as Estimated by Different GPS-Based Methods. *Geomagnetism and Aeronomy* 55, 108–117. <https://doi.org/10.1134/S0016793214060218>.

Zherebtsov G.A. (Ed.), 2012. Seismoionospheric and Seismoelectromagnetic Processes in the Baikal Rift Zone. Integration Projects of SB RAS. Iss. 35. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 304 p. (in Russian) [Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне // Интеграционные проекты СО РАН / Ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. Вып. 35. 304 с.].

Zherebtsov G.A., 2020. Complex of Heliogeophysical Instruments of New Generation. *Solar-Terrestrial Physics* 6 (2), 3–13. <https://doi.org/10.12737/stp-62202001>.